

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

ESTUDIO DE FUERZAS AERODINÁMICAS SOBRE CUERPOS



Memoria i Annexos

Autor: Guillem Chicharro López
Director: Alfred Fontanals Garcia
Convocatoria: Enero 2018

Resumen

En este Trabajo de Final de Grado de Ingeniería Mecánica se ha realizado el estudio del flujo alrededor de una esfera lisa, con el objetivo de obtener las fuerzas de resistencia generadas por el paso del aire a su alrededor. El estudio comprende una parte experimental y otra numérica.

Se han realizado medidas experimentales en el túnel de viento, situado en el laboratorio del departamento de Mecánica de Fluidos de la Escola d'Enginyeria de Barcelona Est, donde se han obtenido las fuerzas de arrastre sobre la esfera a diferentes velocidades del aire.

También se han realizado simulaciones numéricas mediante Dinámica de Fluidos Computacional, del flujo alrededor de la misma esfera, con el objetivo de obtener las fuerzas de resistencia. Para ello se ha realizado una geometría simplificada del túnel. Se han realizado estudios con diferentes mallas y modelos de turbulencia.

Finalmente se han comparado los resultados de ambos, experimentalmente y numéricamente.

Resum

En aquest Treball de Final de Grau d'Enginyeria Mecànica s'ha realitzat l'estudi del flux al voltant d'una esfera llisa, amb l'objectiu d'obtenir les forces de resistència generades pel pas de l'aire al seu voltant. L'estudi comprèn una part experimental i una altra numèrica.

S'han realitzat mesures experimentals en un túnel de vent, situat al laboratori del departament de Mecànica de Fluids de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est, on s'han obtingut les forces d'arrossegament sobre l'esfera a diferents velocitats de l'aire.

També s'han realitzat simulacions numèriques mitjançant Dinàmica de Fluids Computacional, del flux al voltant de la mateixa esfera, amb l'objectiu d'obtenir les forces de resistència. Per a això s'ha creat una geometria simplificada del túnel. S'han realitzat estudis amb diferents malles i models de turbulència.

Finalment s'han comparat els resultats d'ambdós, experimentals i numèrics.

Abstract

In the following Degree's Final Project of Mechanical Engineering, the study of the flow around a smooth sphere has been carried out, with the aim of obtaining the resistance forces generated by the passage of air around it. The study includes an experimental and a numerical part.

Experimental measurements have been made in the wind tunnel, located in the laboratory of the Fluid Mechanics Department of the Escola d'Enginyeria de Barcelona Est, where the drag forces on the sphere have been obtained at different air speeds.

Numerical simulations have also been carried out by Computational Fluid Dynamics, of the flow around the same sphere, with the objective of obtaining the resistance forces. For this, a simplified geometry of the tunnel has been made. Studies have been carried out with different meshes and turbulence models.

Finally, the results of both have been compared, experimentally and numerically.

Agradecimientos

5 años de universidad finalizan con este Trabajo Final de Grado y no podía hacerlo sin antes agradecer a todas las personas que han confiado en mí su paciencia y apoyo a lo largo de este tiempo.

En primer lugar, dar las gracias a mi tutor del proyecto Alfred Fontanals por haberme guiado y ayudado en todo momento desde el día que le propuse trabajar conmigo.

A mi familia por haber aguantado mis cambios de humor constantes en época de exámenes y haberme comprendido incluso cuando era imposible.

Y por último, a mis mejores amigos y en especial a Axel Pairó que ha sido mi mano derecha en todo momento.

Glosario

Dimensión	Símbolo	Unidad	Unidad SI
Área	A	m ²	m ²
Diámetro	D	m	m
Tiempo	t	s	s
Velocidad	v	m/s	m/s
Masa	m	kg	kg
Volumen	V	m ³	m ³
Caudal Másico	\dot{m}	kg/s	kg/s
Caudal Volumétrico	Q	m ³ /s	m ³ /s
Presión	P	Pa	Pa
Potencia	P		
Constante Gases	R	J/K·mol	J/K·mol
Densidad	ρ	kg/ m ³	kg/ m ³
Reynolds	Re	-	-
Viscosidad Dinámica	μ	kg/m·s	kg/m·s
Viscosidad Cinemática	ν	m ² /s	m ² /s
Temperatura	T	K	K
Velocidad Sonido	a	m/s	m/s
Fuerza Arrastre	F _D	N	N
Coeficiente Arrastre	C _D	-	-
Fuerza Sustentación	C _L	N	N
Coeficiente Sustentación	C _L	-	-
Mach	Ma	-	-



Índice

RESUMEN	3
RESUM	4
ABSTRACT	5
AGRADECIMIENTOS	7
GLOSARIO	9
1. PREFACIO	19
2. INTRODUCCIÓN	21
2.1 Objetivos y Abasto	21
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	23
3.1. Tipos de flujo	25
3.2. Conservación de la masa – Ecuación de continuidad	27
3.2.1 Fluido compresible estacionario	28
3.2.2 Fluido incompresible – Ecuación Navier-Stokes	28
3.3. Fluidos irrotacionales.....	29
3.4. Capa límite	31
3.4.1 Flujo laminar	32
3.4.2 Flujo turbulento.....	33
3.4.3 Presión en la capa límite.....	34
3.5. Fuerzas de sustentación y arrastre.....	37
3.5.1 Fuerza de arrastre de una esfera lisa	41
3.6. Separación del flujo.....	43
4 EXPERIMENTAL	45
4.1. Túnel de viento	45
4.2. Principios de funcionamiento.....	45
4.2.1 Clasificación	46
4.3. Túnel de viento utilizado.....	49
4.3.1 Funcionamiento.....	50
4.3.2 Sistemas de medición específicos.....	51
4.3.3 Geometrías de los cuerpos a analizar	54
4.4. Procedimiento.....	56

4.4.1	Experimento 1.....	56
4.4.2	Experimento 2.....	58
4.5.	Resultados.....	59
4.5.1	Ensayo 1	59
4.5.2	Ensayo 2	64
5	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	66
5.1.	Procedimiento	66
5.1.1	Geometría	67
4.5.3	Malla.....	68
5.1.2	Configuración	72
5.2.	Resultados.....	74
5.2.1	Coeficientes de arrastre y sustentación	77
5.2.2	Perfiles de velocidad	82
5.2.3	Presiones	93
7	CONCLUSIONES	99
8	PRESUPUESTO	101
8.1.	Costes Material	101
8.2.	Costes Honorarios.....	102
BIBLIOGRAFÍA		104
Referencias		104
ANEXO A		105
Anexo A.1.....		105
Anexo A.2.....		107
Anexo A.2.1.....		108
ANEXO B		109
ANEXO C		110
Anexo C.1		110
Anexo C.2		112

Índice figuras

Figura 1: Forma Flujo laminar y turbulento. [Fuente: Vetpraxis.net]	26
Figura 2: Volumen de control. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	27
Figura 3: Zonas con flujo rotacional e irrotacional. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	29
Figura 4: Zonas validez ecuación de Laplace. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	31
Figura 5: Flujo laminar plano en estado estacionario paralelo a la pared. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	32
Figura 6: Inestabilidad del flujo en la capa límite. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	33
Figura 7: Zonas de gradiente de presión favorable y adversa. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	34
Figura 8: Diferentes puntos y burbujas de separación. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	34
Figura 9: Efecto del gradiente de presión adverso. [Fuente: Teoría de la capa límite]	35
Figura 10: Gradiente de presión alrededor de una esfera. [Fuente: Teoría de la capa límite]	36
Figura 11: Fuerzas sustentación, arrastre, empuje y peso. [Fuente: La Pizarra de Yuri]	37
Figura 12: Valor coeficiente de arrastre dependiendo de la forma. [Fuente: Wikipedia]	39
Figura 13: C_D – Re esfera. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	40
Figura 14: C_D – Re esfera. [Fuente: La Guía Física]	40

Figura 15: Número Reynolds régimen laminar y turbulento. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	41
Figura 16: Separación capa límite en una esfera con $Re=2000$. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	42
Figura 17: Tipos de estela creadas. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	43
Figura 18: Zonas de mayor y menor presión. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	44
Figura 19: Presión entrada y salida. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]	44
Figura 20: Circuito abierto túnel del viento. [Fuente: F1 al día]	46
Figura 21: Circuito cerrado túnel de viento. [Fuente: Reflexiones prohibidas]	47
Figura 22: Sección abierta túnel de viento. [Fuente: Ing. Aeronáutica]	47
Figura 23: Sección cerrada túnel de viento.	48
Figura 24: Túnel de viento utilizado. [Fuente: Wind tunnel's user guide]	49
Figura 25: Esquema túnel de viento utilizado. [Fuente: Wind tunnel's user guide]	51
Figura 26: Sistema <i>simple-to-fit</i> . [Fuente: Wind tunnel's user guide]	51
Figura 27: Manómetro túnel de viento. [Fuente: Wind tunnel's user guide]	52
Figura 28: Panel de medición del túnel de viento. [Fuente: Wind tunnel's user guide]	53
Figura 29: Geometrías disponibles túnel de viento. [Fuente: Wind tunnel's user guide]	54
Figura 30: Esfera posicionada en cámara de ensayo.	56

Figura 31: Posición 1 Pitot.	Figura 32: Posición 2 Pitot.	58
Figura 33: Posición 3 Pitot.		58
Figura 34: C_D experimental.		62
Figura 35: Comparación fuerza modelo, dummy y total.		63
Figura 36: Perfil Velocidad experimental ensayo 2.		65
Figura 37: Geometría definitiva.		68
Figura 38: Malla esfera. [Fuente: Ansys Fluent]		70
Figura 39: Capa límite 10 capas malla 1. [Fuente: Ansys Fluent]		70
Figura 40: Capa límite 20 capas malla 2. [Fuente: Ansys Fluent]		71
Figura 41: C_D – Re. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]		76
Figura 42: C_D – Re. [Fuente: Capa límite]		76
Figura 43: Gráfica C_D Configuración 1.		77
Figura 44: Gráfica C_D Configuración 7.		78
Figura 45: Gráfica C_D Configuración 8.		79
Figura 46: Gráfica C_D Configuración 9.		79
Figura 47: Gráfica Comparativa Velocidad CFD – Experimental.		80
Figura 48: Gráfica Comparativa número Reynolds CFD – Experimental.		81
Figura 49: Gráfica Perfiles Velocidad 20 m/s.		82
Figura 50: Gráfica Velocidades Malla 1.		83

Figura 51: Gráfica Perfiles Velocidad 30 m/s. _____	84
Figura 52: Velocidad Plano Y Transitorio 30 SAS. _____	85
Figura 53: Velocidad Plano Y Transitorio 20 SST. _____	86
Figura 54: Turbulencia Plano Y Configuración 7. _____	88
Figura 55: Turbulencia Plano Y Configuración 2. _____	89
Figura 56: Velocidad Plano Y Configuración 9. _____	90
Figura 57: Desprendimiento de la capa límite. 30 m/s. SAS. _____	91
Figura 58: Vectores Velocidad retrocediendo debido punto desprendimiento. _____	92
Figura 59: Presión Plano Y Transitorio 20 m/s. _____	93
Figura 60: Presión Plano Z Transitorio 20 m/s. _____	94
Figura 61: Presión Plano Z Transitorio 30 SST. _____	95
Figura 62: Velocidad Plano Z Transitorio 30 SST. _____	95
Figura 63: Turbulencia Plano Z Transitorio 30 SST. _____	96
Figura 64: Presión Plano Z. 30 m/s Transitorio SST. _____	97
Figura 65: Presión Plano Z. 30 m/s Transitorio SAS. _____	98
Figura 66: Velocidad Plano Z. 30 m/s Transitorio SAS. _____	98
Figura 67: Vista exterior cámara ensayo túnel de viento. [Fuente: Wind tunnel's user guide]__	107

Índice tablas

Tabla 1: Clasificación túnel de viento según velocidad.	48
Tabla 2: Datos técnicos geometrías túnel de viento.	55
Tabla 3: Condiciones de ensayo.	59
Tabla 4: Resultados experimentales ensayo 1.	61
Tabla 5: Resultados experimentales ensayo 2.	64
Tabla 6: Resultados Dinámica de Fluidos Computacional.	74
Tabla 7: Comparación resultados CFD – bibliografía.	75
Tabla 8: $Re - C_D$	75
Tabla 9: Costes material.	102
Tabla 10: Costes honorarios.	103
Tabla 11: Detalles técnicos túnel de viento AF100 Tecquipment.	106
Tabla 12: Detalles técnicos AFA2 Module.	108
Tabla 13: Ensayo experimental 1.	110
Tabla 14: Ensayo experimental 2.	111
Tabla 15: Resultados malla 1 20 m/s.	113
Tabla 16: Resultados malla 1 30 m/s.	115
Tabla 17: Resultados malla 2, 30 m/s.	117



1. Prefacio

El Trabajo de Final de Grado está encarado en el campo del análisis de flujo. Área en continuo desarrollo en los diferentes sectores en que esta aparece. El foco y punto de análisis de este TFG es un Túnel de Viento con unas características geométricas y funcionales específicas.

Como ya se ha definido en el resumen, este proyecto se centra en la comparación de los resultados obtenidos experimentalmente en un túnel de viento y computacionalmente con la ayuda de un software de CFD para poder corroborar la validez de ambos. Es por eso que se necesita trabajar con una precisión máxima en ambos procesos.

El origen y la motivación del trabajo tienen el mismo principio: la ingeniería de fluidos.

A lo largo de toda la carrera se abarcan las diferentes ramas de la ingeniería mecánica y, en mi caso, la que más interés ha despertado en mí, ha sido la de la mecánica de fluidos. Hecho por el cual decidí escoger este tema para el trabajo de final de grado, además de por las posibilidades que ofrece trabajar experimental y computacionalmente comparando y corroborando ambos métodos.

2. Introducción

2.1 Objetivos y Abasto

Este documento tiene como finalidad el estudio y análisis de las fuerzas y el flujo alrededor de una esfera lisa. Se determinarán experimentalmente con la ayuda de un Túnel de Viento propiedad de la *Escola d'Enginyeria de Barcelona Est* de la *Universitat Politècnica de Catalunya* y computacionalmente mediante un software de Mecánica de Fluidos Computacional (*Computacional Fluid Dynamics, CFD*). El diseño computacional se realiza con el programa de Mecánica de Fluidos Computacional Ansys Fluent.

Para conseguir una mayor aproximación y precisión, el estudio y análisis computacional de la esfera lisa se realiza en 3D.

3. Fundamentos Teóricos

En este apartado se resumirán los conocimientos básicos de mecánica de fluidos para poder llegar a comprender de forma clara este Trabajo Final de Grado.

En el caso del túnel de viento, como bien indica su nombre, el fluido será viento, es decir, un gas.

En mecánica de fluidos se clasifica un flujo en compresible e incompresible. La compresibilidad se da si la densidad del fluido varía a lo largo de todo el flujo. Un ejemplo claro es el aire, cuya densidad varía dependiendo de la temperatura (aumenta cuando la temperatura disminuye y viceversa). Se puede decir entonces que la densidad es casi proporcional a la presión y obtener resultados bastante precisos utilizando la ley de los gases perfectos.

$$p = \rho RT \quad (3.1)$$

Donde:

p = Presión [Pa]

ρ = Densidad [kg/m^3]

R = Constante gases ideales [$\text{J/K}\cdot\text{mol}$]

T = temperatura [K]

Todas las leyes de la mecánica están escritas para *sistemas* que se definen como cantidades arbitrarias de masa de identidad fija. Se considera el *entorno* a todo lo externo al sistema y que está separado por su *frontera* o *contorno*. El sistema es una cantidad fija de masa, es decir, es constante y de ahí la conservación de la masa:

$$m = \text{cte} ; \frac{dm}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

Teniendo claro el concepto de la conservación de la masa, se puede introducir el del flujo volumétrico o caudal Q o el flujo másico \dot{m} .

$$\dot{m} = \rho VA = \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (3.3)$$

$$Q = VA = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (3.4)$$

Donde:

V = Velocidad [m/s]

A = Área [m²]

3.1. Tipos de flujo

Antes de clasificar los tipos de flujo, se debe introducir el concepto de número de Reynolds. El número de Reynolds es un número adimensional que caracteriza el movimiento del fluido y que depende de su velocidad, el diámetro o ancho que atraviesa el fluido y de la viscosidad cinemática del mismo fluido.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (3.5)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.6)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds []

V = Velocidad [m/s]

D = Diámetro objeto [m]

ν = Viscosidad cinemática [m²/s]

μ = Viscosidad dinámica [kg/m·s]

ρ = Densidad [kg/m³]

Ahora sí, se pueden clasificar los flujos en dos tipos: laminar y turbulento.

- Laminar

Se considera flujo laminar al movimiento de un fluido cuando este es ordenado, estratificado y suave.

- Turbulento

Un flujo turbulento tiene un movimiento caótico en que las partículas se mueven desordenadamente con trayectorias irregulares en forma de pequeños remolinos.

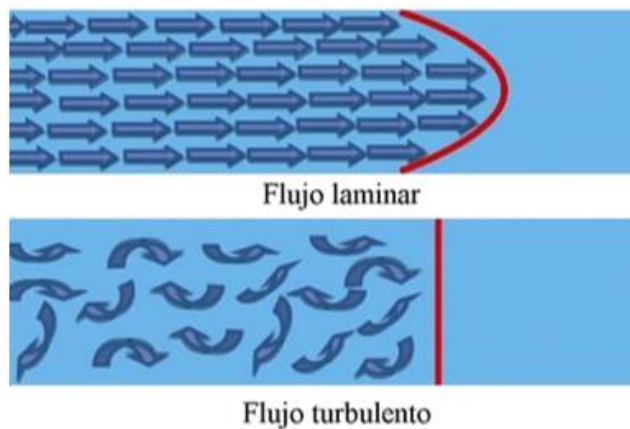


Figura 1: Forma Flujo laminar y turbulento. [Fuente: Vetpraxis.net]

3.2. Conservación de la masa – Ecuación de continuidad

Considerando el volumen de control de la figura 2 y analizándolo con dx , dy y dz , se obtiene que las ecuaciones de continuidad, que Euler estableció en su momento, en coordenadas cartesianas y cilíndricas son:

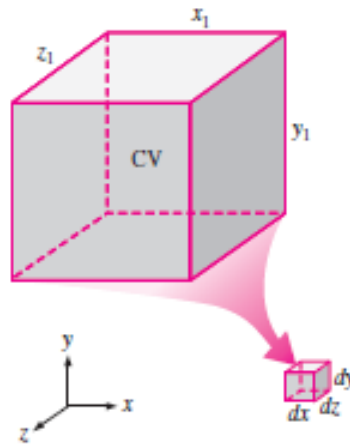


Figura 2: Volumen de control. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.7)$$

Coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.8)$$

Coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.9)$$

Una vez definida la ecuación de continuidad, se exponen dos casos especiales.

3.2.1 Fluido compresible estacionario

Al tener un estado estacionario, es decir, no dependiente del tiempo,

Coordenadas cartesianas:

$$\vec{\nabla}(\rho\vec{V}) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.10)$$

Coordenadas cilíndricas:

$$\vec{\nabla}(\rho\vec{V}) = \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.11)$$

3.2.2 Fluido incompresible – Ecuación Navier-Stokes

Como ya se ha definido anteriormente, la compresibilidad viene ligada con el cambio de densidad en el tiempo o espacio. Por otro lado, la incompresibilidad, no. Al no haber una variación de la densidad, la ecuación de continuidad varía:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.12)$$

Coordenadas cartesianas:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.13)$$

Coordenadas cilíndricas:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(u_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

Para flujos incompresibles, es decir, flujos cuya densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo su recorrido, las ecuaciones de Navier Stokes se definen como:

Ecuación de momento:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{V} \quad (3.15)$$

Otra condición que tienen que cumplir los flujos incompresibles es la de tener un número de Mach igual o inferior a 0,3.

$$Ma = \frac{V}{a} \quad (3.16)$$

Donde:

V = Velocidad [m/s]

a = Velocidad del sonido ≈ 340 m/s

3.3. Fluidos irrotacionales

Cuando se tiene un fluido que se desplaza en una corriente circular, pero las partículas del fluido no giran alrededor del eje que pasa por su centro de masas, se dice que el flujo es irrotacional. En caso contrario estamos ante un flujo rotacional.

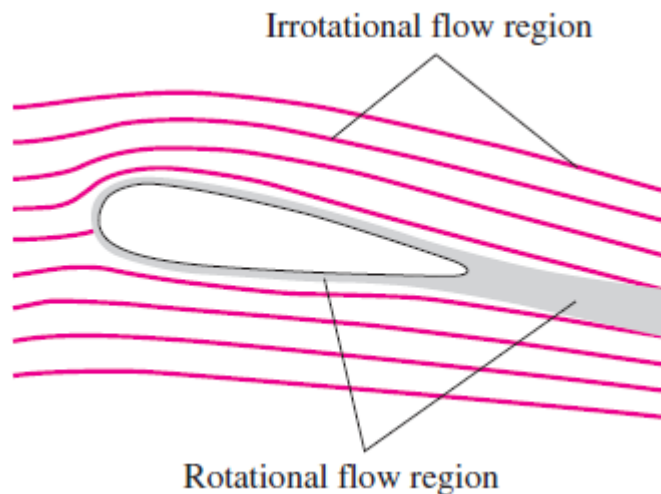


Figura 3: Zonas con flujo rotacional e irrotacional. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

En este concepto entra en juego la vorticidad. Se entiende por vorticidad la magnitud física empleada en mecánica de fluidos y en el mundo meteorológico para cuantificar la rotación de un fluido.

Se puede considerar, por ahora, casi despreciable:

$$\vec{\nabla} \times \vec{V} \simeq 0 \quad (3.17)$$

Se define el gradiente del vector escalar como función potencial ϕ^1 . Teniendo una región con fluido irrotacional, el vector velocidad se puede expresar como el gradiente de una función escalar llamada función potencial de velocidad:

$$\vec{V} = \vec{\nabla} \phi \quad (3.18)$$

Sustituyendo se obtiene el operador laplaciano llamado también ecuación de Laplace que solo es válido cuando se tiene un flujo irrotacional:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3.19)$$

Coordenadas cartesianas:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.20)$$

Coordenadas cilíndricas:

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.21)$$

¹ Para más información consultar *Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición*.

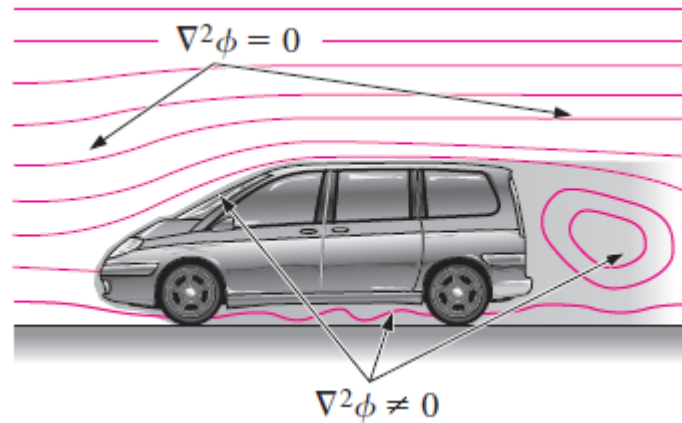


Figura 4: Zonas validez ecuación de Laplace. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

3.4. Capa límite

La principal condición que se debe tener en cuenta en la capa límite es la de no-deslizamiento en la pared. A partir de observaciones experimentales, se ha comprobado que las partículas en movimiento que se encuentran en contacto con la superficie sólida sobre la que circulan, llegan a detenerse debido a los efectos viscosos del fluido que hacen que este se adhiera a dicha superficie.

Se deduce entonces que, al tener velocidad 0 en las paredes del sólido, la condición de no-deslizamiento genera un perfil de velocidades desde la velocidad 0 en las paredes hasta la velocidad libre del fluido.

La capa límite es la región del flujo en la que los efectos debido a la viscosidad son significativos y establece una relación entre las ecuaciones de Euler y Navier-Stokes y entre la condición de deslizamiento y la de no-deslizamiento.

Se debe considerar una capa límite δ muy delgada a lo largo de una placa situada en un punto x . Hence estableció que, para una determinada posición x , cuanto mayor sea el número de Reynolds, más delgada será la capa límite.

$$Re_x = \frac{\rho V_x}{\mu} = \frac{V_x}{\nu} \quad (3.22)$$

$$\frac{\delta}{x} \ll 1 \quad (3.23)$$

3.4.1 Flujo laminar

Para una mayor comprensión, se supondrá un flujo laminar en estado estacionario en el plano xy donde x es el eje paralelo a la pared. Se define U como la magnitud de velocidad paralela a la pared y situada justo encima de la capa límite.

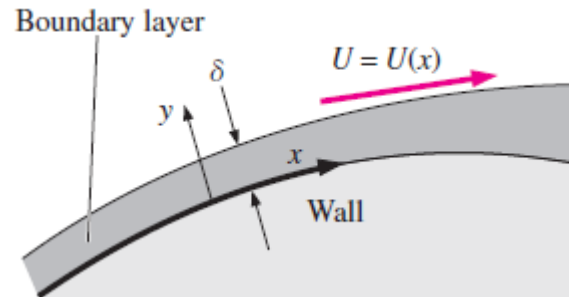


Figura 5: Flujo laminar plano en estado estacionario paralelo a la pared. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

Aplicando la ecuación de Navier-Stokes se obtienen las ecuaciones de la capa límite:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial y} \approx 0 \quad (3.24)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.25)$$

3.4.2 Flujo turbulento

No es posible obtener las expresiones matemáticas exactas de un flujo turbulento y es por eso que se hace una aproximación. El flujo turbulento es siempre un flujo transitorio, es decir, dependiente del tiempo. Una aproximación muy común de las ecuaciones en una placa son:

$$\frac{u}{U} \approx \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}} \text{ para } y \leq \delta \quad (3.26)$$

$$\frac{u}{U} \approx 1 \text{ para } y > \delta \quad (3.27)$$

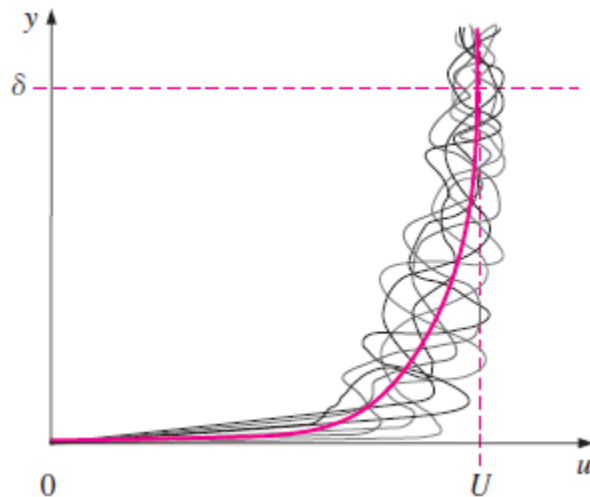


Figura 6: Inestabilidad del flujo en la capa límite. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

3.4.3 Presión en la capa límite

Se establecen varios conceptos que serán explicados más adelante mediante expresiones matemáticas:

- Si un fluido no-viscoso y/o irrotacional externo a la capa límite acelera, $U(x)$ aumenta y $P(x)$ disminuye. Es decir, aumenta la velocidad y disminuye la presión. Se tendrá entonces un gradiente de presión favorable.
- Si se da el caso contrario, se tendrá un gradiente de presión adverso. Esta última condición no es deseable, ya que implica una capa límite con demasiado grosor y no lo suficientemente cerca de la pared.

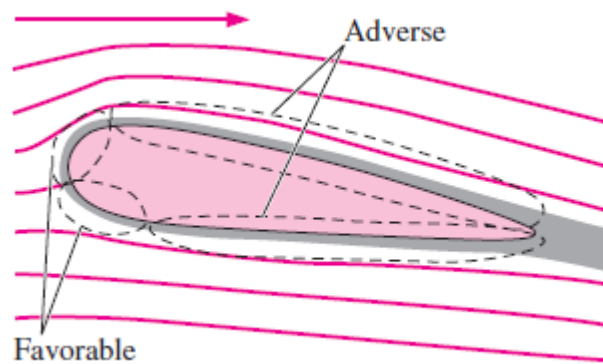


Figura 7: Zonas de gradiente de presión favorable y adversa. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

Las ecuaciones de la capa límite no son válidas en el punto de separación debido al flujo inverso en la burbuja de separación. Véase la figura para mayor comprensión.

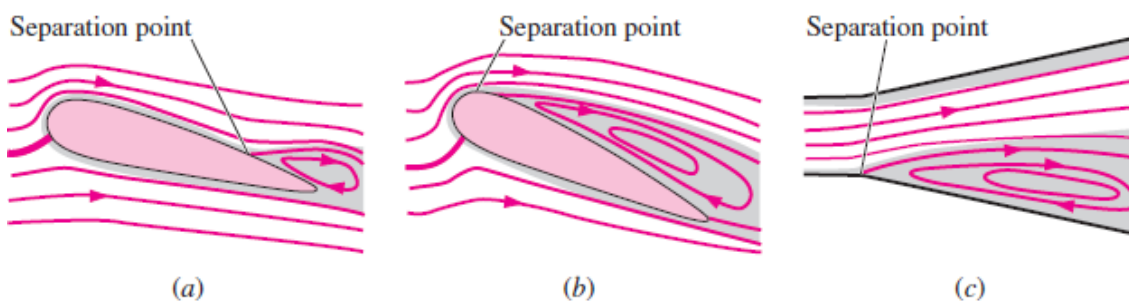


Figura 8: Diferentes puntos y burbujas de separación. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

Si ahora se observan los perfiles de velocidad, sabiendo que en las paredes la velocidad es 0, se pueden estudiar los gradientes de presiones en la pared:

$$v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{y=0} = -U \frac{dU}{dx} = \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} \quad (3.28)$$

La capa límite no crece indefinidamente, llegando a desprenderse en un momento dado. Si se da un gradiente adverso $\frac{dp}{dx} > 0$, el fluido se frena y provoca el crecimiento de la capa límite.

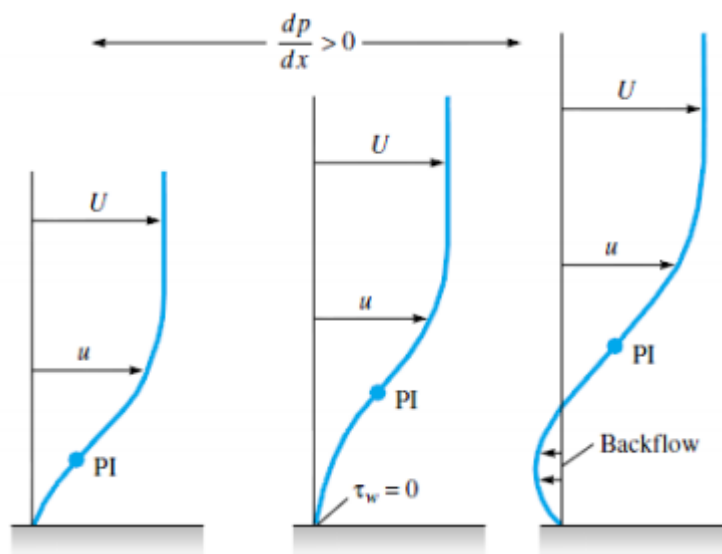


Figura 9: Efecto del gradiente de presión adverso. [Fuente: Teoría de la capa límite]

El ángulo de desprendimiento de la capa límite está directamente relacionada con el tipo de flujo. Para $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$, se tiene flujo laminar. Para $\varphi > 90^\circ$, flujo turbulento.

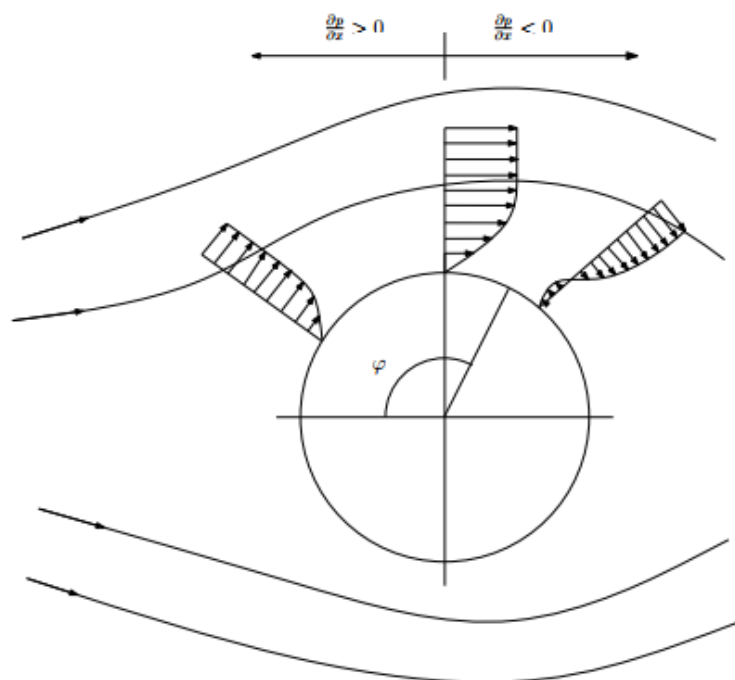


Figura 10: Gradiente de presión alrededor de una esfera. [Fuente. Teoría de la capa límite]

3.5. Fuerzas de sustentación y arrastre

Si se simplifican las fuerzas ocasionadas por la acción de un cuerpo en movimiento inmerso en un fluido a solo dos fuerzas, se pueden definir estas como fuerza de sustentación y fuerza de arrastre (*lift* y *drag* en inglés respectivamente). Ambas dependen de la dirección en la que actúan:

- La **fuerza de sustentación** es la fuerza ocasionada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo.
- La **fuerza de arrastre** es la fuerza ejercida por el fluido en dirección contraria a la fuerza que ejerce el cuerpo en movimiento.

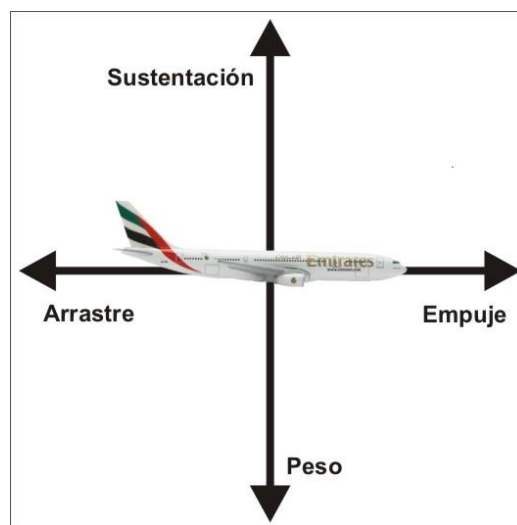


Figura 11: Fuerzas sustentación, arrastre, empuje y peso. [Fuente: La Pizarra de Yuri]

Las fuerzas de sustentación y arrastre dependen de la densidad ρ del fluido, de la velocidad V y de la geometría y forma del cuerpo. Para cuantificar el arrastre y/o la sustentación de un objeto en un fluido, se utilizan las constantes adimensionales C_D y C_L :

Coeficiente de arrastre:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (3. 29)$$

Donde:

F_D = Fuerza de arrastre [N]

ρ = Densidad [kg/m³]

V = Velocidad [m/s]

A = Área [m²]

Coeficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (3. 30)$$

Donde:

F_D = Fuerza de sustentación [N]










ρ = Densidad [kg/m³]

V = Velocidad [m/s]

A = Área frontal de impacto [m²]

El término $\frac{1}{2} \rho V^2$ representa la presión dinámica.

La forma y geometría del cuerpo juegan un papel importante en los coeficientes. Como se puede observar en la siguiente figura 12, cuanto mayor es la aerodinámica del cuerpo, menor es el coeficiente de arrastre. Este fenómeno es debido a la relación L/D donde L es la longitud del cuerpo en la dirección del fluido y D la anchura.

Shape		Drag Coefficient
Sphere		0.47
Half-sphere		0.42
Cone		0.50
Cube		1.05
Angled Cube		0.80
Long Cylinder		0.82
Short Cylinder		1.15
Streamlined Body		0.04
Streamlined Half-body		0.09

Measured Drag Coefficients

Figura 12: Valor coeficiente de arrastre dependiendo de la forma. [Fuente:

Wikipedia]

Dado que la velocidad a lo largo de la superficie del cuerpo no es constante, los coeficientes de arrastre y sustentación varían también. Se calcula entonces el promedio de todos los valores dados en la superficie del cuerpo y se obtiene así un valor medio de los coeficientes. La velocidad, la viscosidad cinemática y el diámetro del objeto determinan el número de Reynolds, Re . C_D es entonces una función de Re .

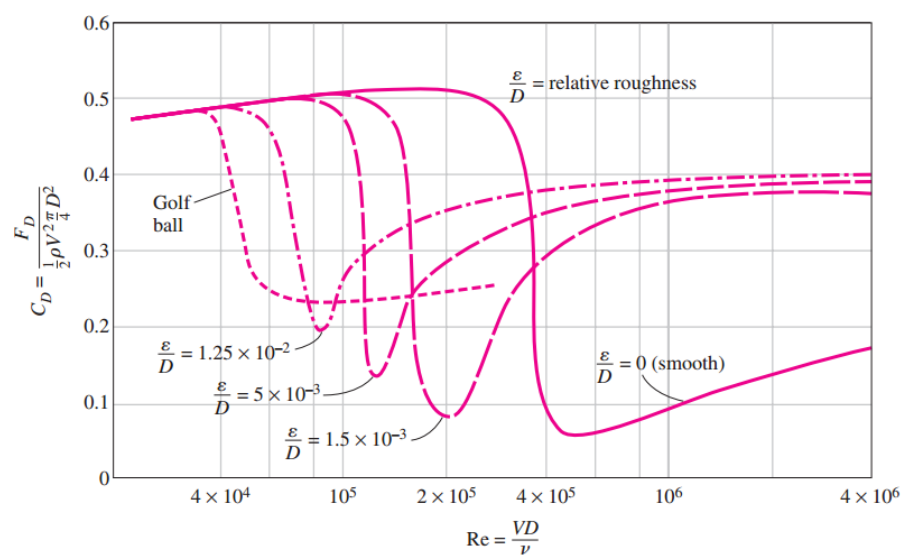


Figura 13: C_D – Re esfera. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

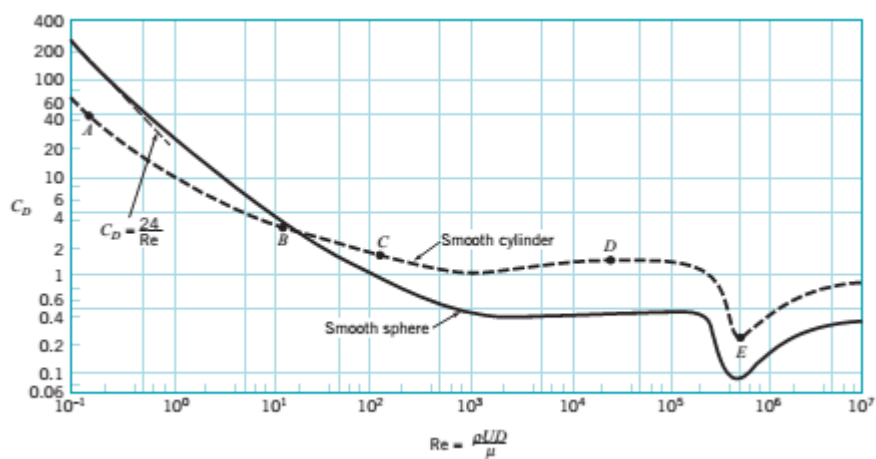


Figura 14: C_D – Re esfera. [Fuente: La Guía Física]

3.5.1 Fuerza de arrastre de una esfera lisa

Se le dedicará ahora mayor atención a la fuerza de arrastre dado que es la fuerza con mayor influencia en los cuerpos a consecuencia de un flujo de corriente.

Como ya se ha definido anteriormente, el coeficiente de arrastre depende del número de Reynolds, especialmente para valores por debajo de 10^4 . Se puede aproximar que, para una esfera con $Re \leq 1$,

$$C_D = \frac{24}{Re} \rightarrow F_D = \frac{C_D A \rho V^2}{2} = 3\pi\mu VD \quad (3.31)$$

Esta última ecuación es conocida como Ley de Stokes y muestra que, para un valor bajo del número de Reynolds, la fuerza de arrastre es proporcional al diámetro, a la velocidad y a la viscosidad del fluido.

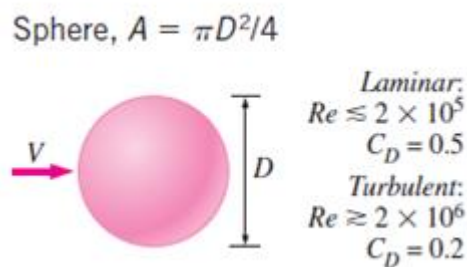


Figura 15: Número Reynolds régimen laminar y turbulento. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

Para una esfera con valores inferiores a $Re < 2 \times 10^5$ el flujo es laminar. Se puede establecer el valor crítico de Reynolds en un flujo a través de una esfera en $Re \approx 2 \times 10^5$. El flujo es de transición entre $2 \times 10^5 \leq Re \leq 2 \times 10^6$ resultando turbulento para $Re \geq 2 \times 10^6$.

Los patrones que sigue el flujo que atraviesa una esfera son complejos de explicar. El fluido choca a una determinada con la esfera y se divide aproximadamente en el punto medio en dos flujos que rodean la esfera, uno por encima y otro por debajo. Este choque en el punto medio o punto de estancamiento produce un aumento de presión en ese determinado punto a la vez que una disminución de la presión justo en la parte posterior de la esfera. Por otro lado, la velocidad aumenta.

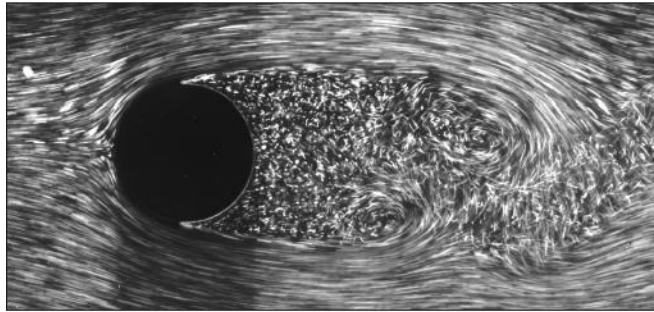


Figura 16: Separación capa límite en una esfera con $Re=2000$. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

Debido al incremento de presión en el punto de estancamiento y la disminución en el lado opuesto, juega un papel importante en el coeficiente de arrastre. Se pueden dar varios casos:

- Para $Re \leq 1$, el coeficiente de arrastre disminuye con el incremento del número de Reynolds y se cumple que $C_D=24/Re$.
- Para $Re = 10$, la separación empieza en la parte posterior produciendo vórtices a partir de $Re \simeq 90$. La región de separación sufre un incremento con el aumento de Reynolds alrededor de $Re = 10^3$. El coeficiente de arrastre decrece si el número de Reynolds aumenta entre $10 < Re < 10^3$.
- Para $10^3 < Re < 10^5$, el coeficiente de arrastre permanece relativamente constante. El flujo en el contorno es laminar pero el flujo en regiones más alejadas es turbulento con una estela altamente turbulenta.
- Para $10^5 < Re < 10^6$ aparece una caída repentina del coeficiente de arrastre dado que el flujo más cercano al contorno de la esfera pasa de ser laminar a turbulento.

3.6. Separación del flujo

Suponiendo un flujo a velocidad constante a lo largo de una superficie con geometría y forma constante, se observa que el flujo no sufre alteración alguna. En cambio, si el objeto presenta un cambio de curvatura o forma, dependiendo de la velocidad del flujo, este afectará en el recorrido del fluido. Cuanto mayor sea la velocidad del flujo, menor será la posibilidad de este de permanecer “a ras” de suelo sin despegarse. A este fenómeno se le llama *separación de flujo*.

Esta separación depende del número de Reynolds y de la rugosidad del cuerpo entre otros. La presión y la velocidad en la zona de separación del flujo disminuyen y crean turbulencias y vórtices. Esta zona es conocida como *estela*. Una vez superada la región de separación de flujo, este vuelve a reestablecerse lentamente.

Los vórtices son una de las principales consecuencias de este cambio. Refiriéndose específicamente a flujos a través de cilindros y esferas, los vórtices se producen para $Re \geq 90$.

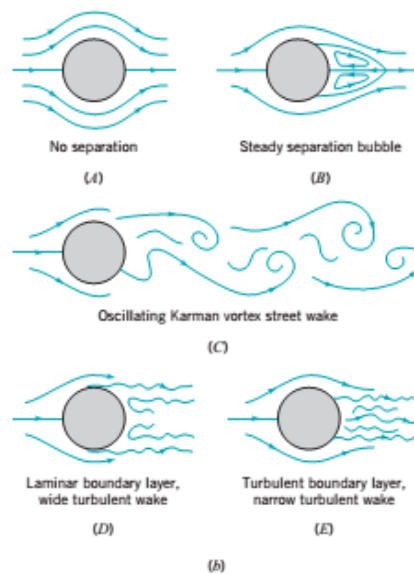


Figura 17: Tipos de estela creadas. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

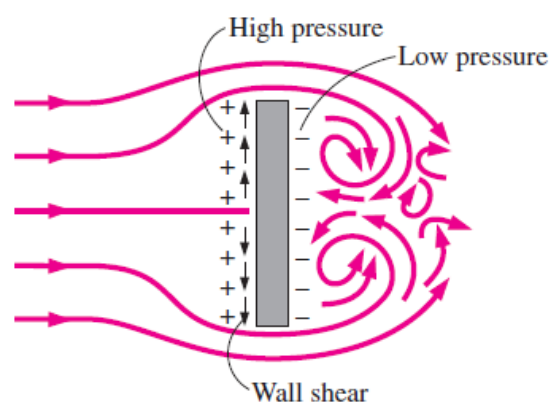


Figura 18: Zonas de mayor y menor presión. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y

aplicaciones 1ª edición]

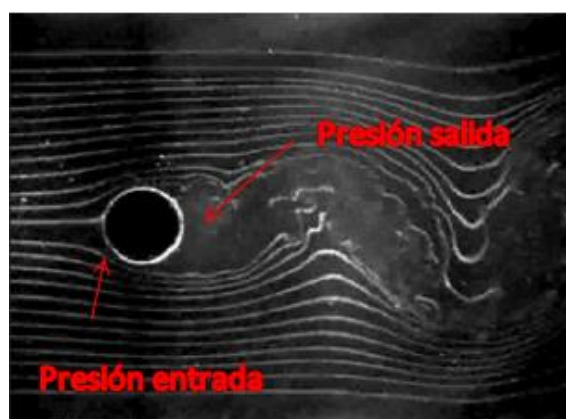


Figura 19: Presión entrada y salida. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y

aplicaciones 1ª edición]

4 Experimental

4.1. Túnel de viento

Un túnel de viento (TdV) o túnel aerodinámico es, según la RAE, “un túnel donde se somete un objeto, generalmente un modelo a escala, a la acción de corrientes de aire controladas, para estudiar su comportamiento aerodinámico”.

El túnel de viento es el método más rápido y económico de evaluar el comportamiento de diferentes objetos bajo el efecto de un tipo de flujo determinado. Esta facilidad viene dada por la posibilidad de trabajar y simular situaciones reales a escalas reducidas obteniendo resultados e informaciones reales, precisas y detalladas.

4.2. Principios de funcionamiento

El principio de funcionamiento está basado en que el fluido (aire) es soplado o aspirado a través de un ducto equipado con una sección de ensayos donde se colocan modelos de distintas geometrías para su estudio.

A continuación se expondrán los distintos túneles de viento y sus principales características y distinciones.

En el interior de viento, en la zona de trabajo, se encuentra el cuerpo que se desea estudiar. Este permanece estático en el interior de la cámara de ensayo mientras que, al mismo tiempo, una corriente de aire es aspirada con la ayuda de un ventilador, situado a la salida del túnel de viento, y pasa alrededor del cuerpo a analizar. Para que el aire entre de la manera más laminar y estable posible, se sitúa un acondicionador de flujo justo en la entrada.

4.2.1 Clasificación

Los túneles de viento se clasifican dependiendo de sus características de trabajo: topología física (tipo de retorno), la configuración de la cámara de ensayo y la velocidad de ensayo.

Tipo de retorno

- Circuito abierto:

El flujo de aire se introduce por la sección de entrada, describe una trayectoria recta y abandona el TdV por la sección de salida.

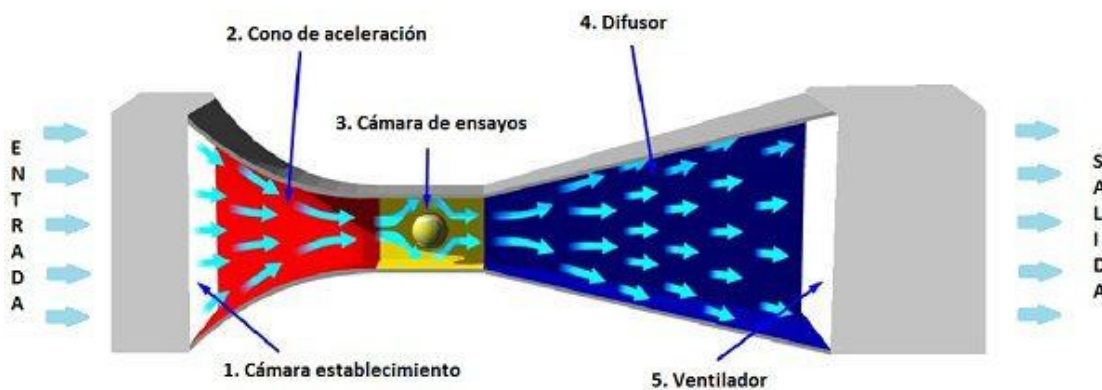


Figura 20: Circuito abierto túnel del viento. [Fuente: F1 al día]

Dentro de este tipo de túneles de viento se encuentran dos versiones:

- Tipo soplador: el ventilador se encuentra antes de la cámara de ensayos.
- De succión o aspirado: el ventilador está situado después de la cámara de ensayos.

- Circuito cerrado:

El flujo circula por el interior del túnel sin abandonarlo en ningún momento, reciclando así de manera continua el aire.

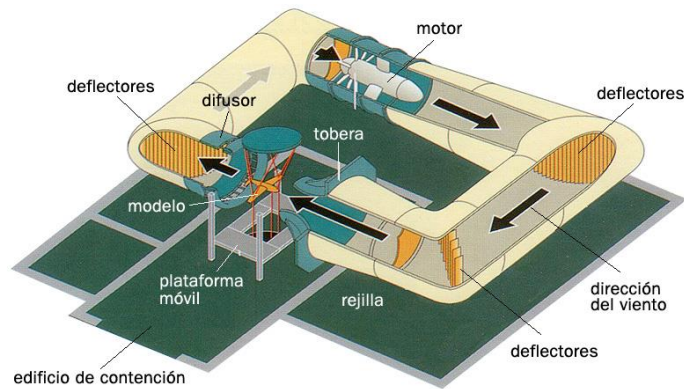


Figura 21: Circuito cerrado túnel de viento. [Fuente: Reflexiones prohibidas]

Cámara de ensayo

Se distinguen dos tipos de cámara de ensayo:

- Sección abierta

La cámara de ensayo está comunicada por su entrada y/o salida con el exterior.



Figura 22: Sección abierta túnel de viento. [Fuente: Ing. Aeronáutica]

- Sección cerrada

La cámara de ensayo aísla con paredes el flujo, que circula por su interior, del exterior durante el ensayo.

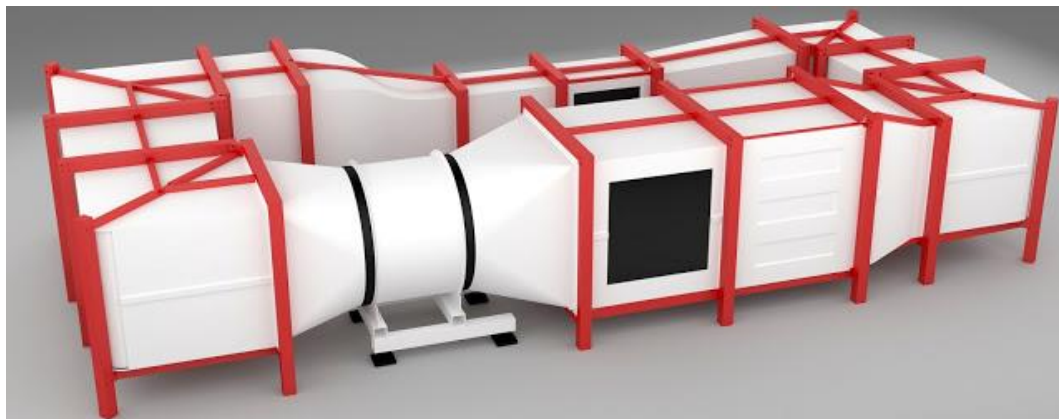


Figura 23: Sección cerrada túnel de viento.

Velocidad de ensayo

Una vez clasificados por tipo de circuito y cámara, se especificarán ahora por tipos de velocidades. La velocidad influye directamente en el número de Mach (explicado anteriormente en la sección 3.2.2). El valor de este clasificará el tipo de túnel de viento. Véase la siguiente tabla:

Tipo	Velocidad Operativa
De baja velocidad	$Ma < 0,6$
Subsónicos	$0,6 < Ma < 0,85$
Transónicos	$0,85 < Ma < 1.2$
Supersónicos	$1,2 < Ma < 5$
Hipersónicos	$5 < Ma$

Tabla 1: Clasificación túnel de viento según velocidad.

En el próximo punto se explicarán con detalle las características técnicas del túnel de viento utilizado para este TFG.

4.3. Túnel de viento utilizado

El túnel de viento del que dispone la *Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE)* de la *Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)* es un túnel de viento de la marca TecQuipment modelo Subsonic Wind Tunnel (AF100).



Figura 24: Túnel de viento utilizado. [Fuente: Wind tunnel's user guide]

Con la explicación previa de los diferentes túneles de viento, se establece que, el túnel de viento utilizado para este TFG es un túnel de viento de circuito abierto, cámara abierta y de baja velocidad. Las dos primeras características son obvias. El tipo de velocidad no. Se debe matizar que la velocidad de ensayo máxima que alcanza el TdV es de 36 m/s. Si se hace el cálculo:

$$Ma = \frac{v}{a} = \frac{36 \frac{m}{s}}{340 \frac{m}{s}} = 0,1059 < 0,6 \rightarrow \text{Baja velocidad}$$

- Dimensión total: 3700 x 1065 x 1900 (mm)
- Dimensión área trabajo: 305 x 305 x 600 (mm)
- Peso: 450 kg
- Velocidad de trabajo del aire: [0 ; 3,6] m/s
- Temperatura de trabajo: [5 ; 40] °C

4.3.1 Funcionamiento

El modelo Subsonic Wind Tunnel (AF100) funciona de la siguiente manera:

El aire entra en el túnel a través de un cono que acelera el aire de manera lineal. Este entra entonces en la zona de trabajo y pasa a través de una rejilla antes de atravesar el difusor¹. La rejilla protege el ventilador en caso de que algún objeto se desprenda. El aire deja atrás el ventilador, pasa a través un silenciador y de nuevo sale a la atmósfera.

Un sistema de control e instrumentación controla la velocidad axial del ventilador al mismo tiempo que la velocidad en la zona de trabajo. El sistema de control e instrumentación incluye manómetros y salidas de corriente para suministrar energía eléctrica a los demás instrumentos.

La zona de trabajo tiene una geometría cuadrada vista desde el alzado (305 x 305 mm) y una longitud de 605 mm.

Dos sondas en la zona de trabajo se encargan de sostener y conectar los manómetros y demás instrumentos que después serán usados para obtener los resultados.

El TdV tiene un sistema de parado de emergencia para cualquier situación que requiera desconectar el sistema en caso de peligro y/o necesidad.

¹ Difusor: Dispositivo para la reducción de la velocidad y aumento de la presión estática de un fluido que pasa a través de un sistema

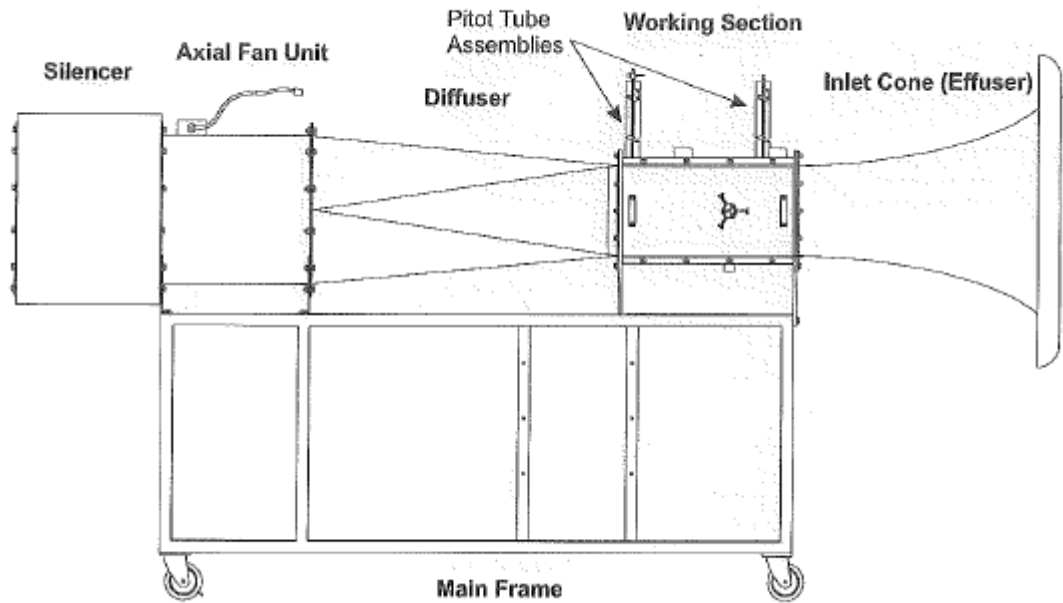


Figura 25: Esquema túnel de viento utilizado. [Fuente: Wind tunnel's user guide]

4.3.2 Sistemas de medición específicos

1. Medición de los coeficientes de sustentación y resistencia

Un sistema *simple-to-fit* (ajuste simple) montado en el lateral del túnel de viento se encarga de mantener los modelos en la zona de trabajo y de realizar las medidas de las fuerzas de sustentación y de resistencia que se crean por el movimiento del aire.



Figura 26: Sistema *simple-to-fit*. [Fuente: Wind tunnel's user guide]

2. Manómetro

El manómetro es el instrumento utilizado para medir la presión de entrada y de salida del aire en el túnel de viento. En nuestro caso es un tubo de 36 con un máximo de 600 mm de agua. Las unidades de ambos manómetros son milímetros columna de agua (mm.c.a.). Ambos están situados en la parte superior de la zona de trabajo (véase imagen 27 “Pitot Tube Assemblies”) y utilizan un pitot de 300mm de longitud como elemento de medida.

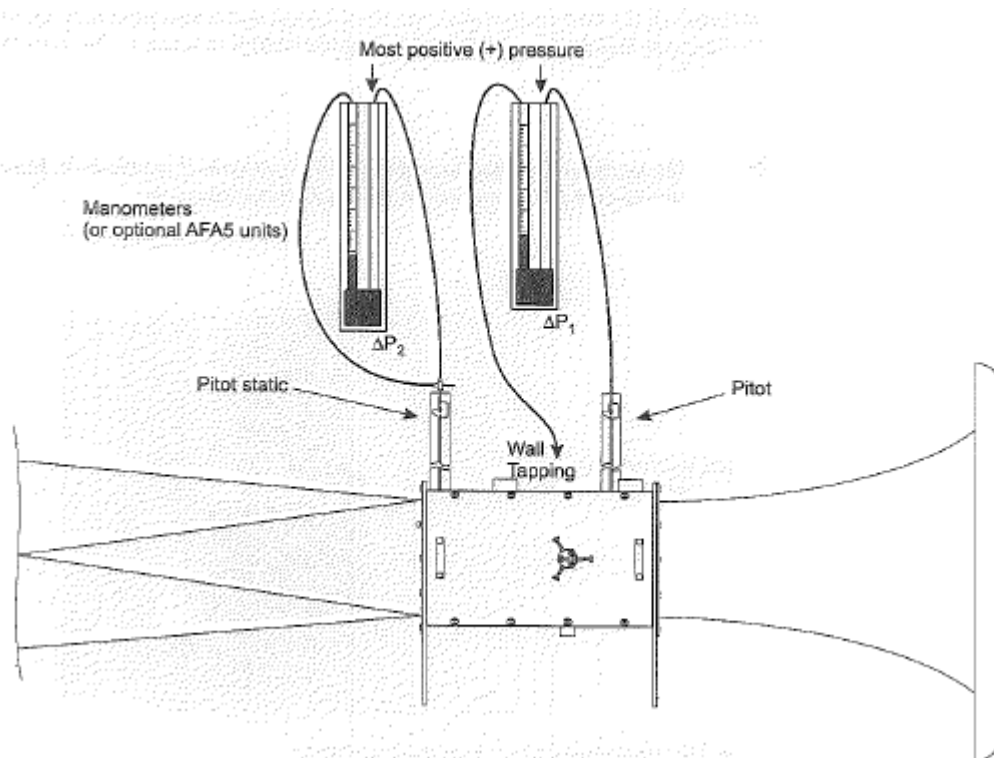


Figura 27: Manómetro túnel de viento. [Fuente: Wind tunnel's user guide]

3. Basic Balance

Este elemento es una celda de carga única que se encuentra en el interior de la zona de trabajo del TdV y se encarga de medir las fuerzas de arrastre y de sustentación.

4. Control del ángulo

Una de las características del TdV es el ángulo de trabajo. Es decir, el ángulo en el que se sitúa la pieza u objeto a analizar para la obtención de diferentes resultados en función del ángulo de trabajo.

5. Panel de medición

En él se encuentran los manómetros, el botón de encendido y apagado y el controlador de velocidad

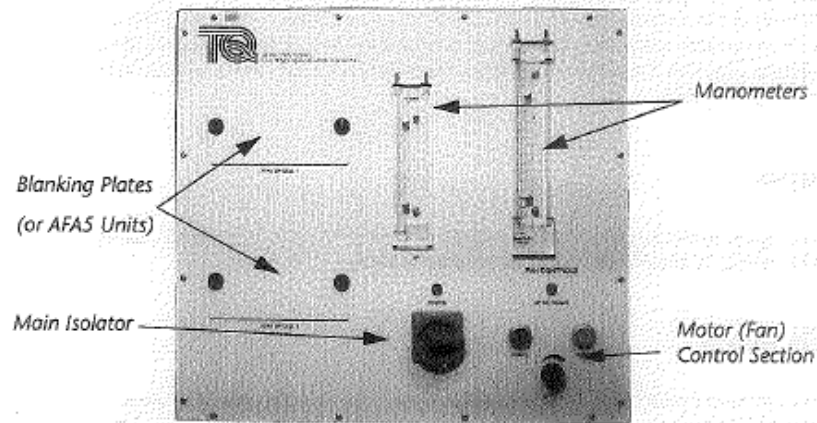


Figura 28: Panel de medición del túnel de viento. [Fuente: Wind tunnel's user guide]

Informaciones técnicas y detalladas, se encuentran en el apartado anexos A1.

4.3.3 Geometrías de los cuerpos a analizar

Existen 5 geometrías distintas:

- (a) Esfera.
- (b) Media esfera.
- (c) Placa plana.
- (d) Esfera con hoyuelos.
- (e) Gota de agua.
- (f) Vástago.

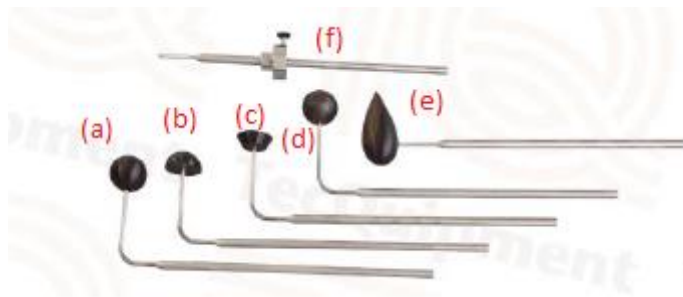


Figura 29: Geometrías disponibles túnel de viento. [Fuente: Wind tunnel's user guide]

Tipo	Geometría	Detalles técnicos
a	Esfera lisa	D = 50mm m = 0,55 kg V = 450 x 150 x 50 mm ³
b	Media esfera	D = 50mm m = 0,55 kg V = 450 x 150 x 50 mm ³
d	Placa plana	D = 50mm m = 0,4 kg V = 450 x 120 x 50 mm ³
d	Esfera con hoyuelos	D = 50mm m = 0,55 kg V = 450 x 150 x 50 mm ³
e	Gota de agua	D = 50mm m = 0,7 kg V = 450 x 130 x 50 mm ³
f	Vástago para la compensación de fuerzas, (<i>dummy</i>)	

Tabla 2: Datos técnicos geometrías túnel de viento.

4.4. Procedimiento

En este apartado se enumerarán y detallarán los pasos seguidos durante la medición y obtención de datos experimentales en el túnel de viento.

Se han realizado dos tipos de experimentos diferentes. En el primero de ellos se realizaron medidas para obtener la fuerza total que actúa sobre la esfera. En el segundo, se pretendía calcular el perfil de velocidades.

4.4.1 Experimento 1

1. Comprobar que todos los elementos de medición estén bien colocados y calibrados.
2. Retirar uno de los paneles, y a la vez pared lateral de la zona de trabajo del TdV, y colocar el objeto a analizar. En este caso, la esfera.
3. Introducir vástago para la compensación de fuerzas, (*dummy*).



Figura 30: Esfera posicionada en cámara de ensayo.

4. Se debe medir la altura y distancia en los ejes y y z para asegurar que la esfera está situada en medio.
5. El siguiente paso es ajustar el ángulo de ataque en 0° . Al tratarse de una esfera, aunque se introdujera un ángulo de ataque, lo único que variaría son las coordenadas x e y dada la homogeneidad del cuerpo.

6. Ajustar pitot a la altura deseada.
7. Comprobar que todo está bien ajustado y empezar la prueba.
8. Ir variando la presión del tubo Pitot y apuntar los resultados de fuerza obtenidos por el TdV.

Este procedimiento debe repetirse una segunda vez, cambiando ahora el panel de sujeción de la esfera con el vástago 1 y el vástago 2 dummy. Este cambio se debe hacer dado que la función del vástago 2 es compensar las fuerzas ejercidas sobre el vástago de la esfera. Se debe situar a la misma altura y a 1 mm del vástago 1. Al tomar las diferentes medidas de fuerza en el primer experimento, se determinan unas fuerzas. Tomando ahora las mismas medidas dadas por el TdV pero con los vástagos cambiados de posición, se puede realizar la resta y obtener así la fuerza real sobre la esfera.

4.4.2 Experimento 2

Mismo procedimiento que en el experimento 1 hasta el punto 7, con la única diferencia que ahora el pitot utilizado para medir la velocidad es el que está situado más cerca de la salida.

En el punto número 8 se debe ir variando la posición vertical del pitot, acercándose cada vez más a la esfera para poder obtener el perfil de velocidades cerca de la esfera.

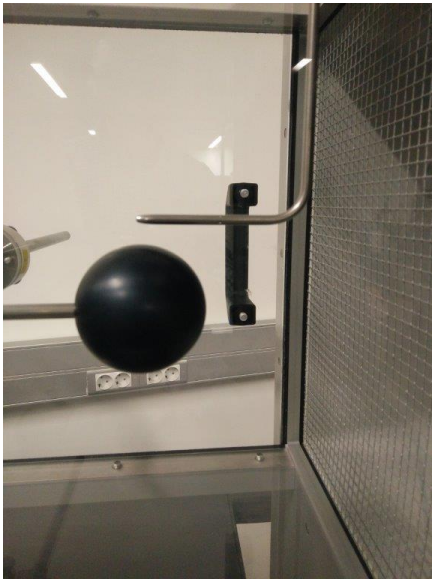


Figura 31: Posición 1 Pitot.

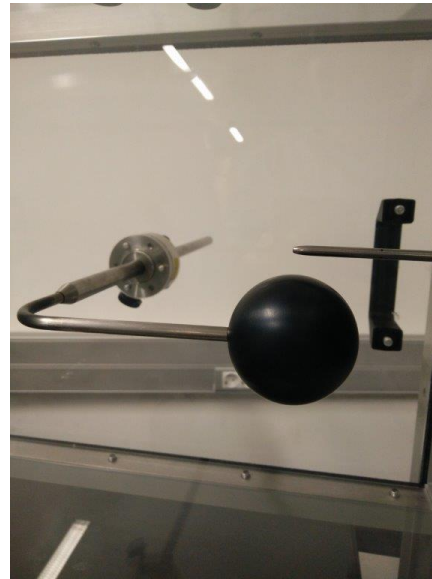


Figura 32: Posición 2 Pitot.

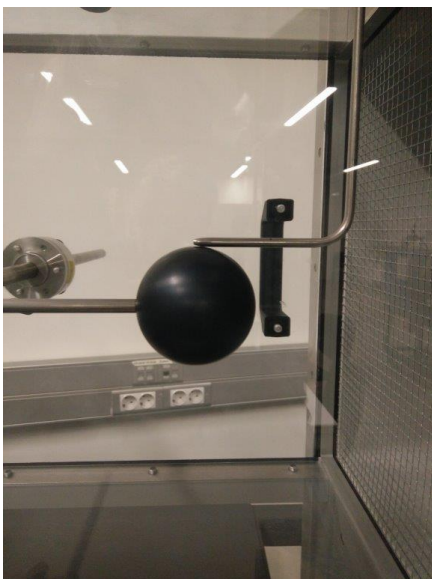


Figura 33: Posición 3 Pitot.

4.5. Resultados

En este apartado se expondrán los datos recogidos experimentalmente con el Túnel de Viento y los posteriores cálculos para después hacer la comparativa con los resultados computacionales.

Se realizaron dos ensayos. Ambos con las siguientes condiciones:

Dimensión	Valor
Temperatura (T)	20°C
Densidad (ρ)	1,22 kg/m ³
Presión atmosférica (P_{atm})	1025 mmbar
Diámetro esfera (D)	50 mm
Viscosidad dinámica aire (μ)	1,80x10 ⁻⁵ Pa·s
Área esfera (A)	1,964x10 ⁻³ m ²

Tabla 3: Condiciones de ensayo.

4.5.1 Ensayo 1

Siguiendo el procedimiento especificado en el apartado Experimento 1, se tomaron las fuerzas del modelo y del dummy, para después obtener la fuerza total, haciendo variaciones de presión.

Con la fuerza total se calcula el coeficiente de arrastre, C_D , para cada ensayo mediante la fórmula:

$$C_D = \frac{F_D}{0,5\rho V^2 A} \quad (4.1)$$

Donde:

F_D = Fuerza arrastre [N]

ρ = Densidad [kg/m³]

V = Velocidad [m/s]

A = Área [m²]

Con los la viscosidad, la velocidad obtenida, el área y la fuerza total, se calcula el Reynolds a partir de la ecuación 3.5 y con este se puede determinar el tipo de flujo sabiendo que

$$Re \leq 2 \cdot 10^5 \rightarrow \text{flujo laminar}$$

$$Re \geq 2 \cdot 10^6 \rightarrow \text{flujo turbulento}$$

Y por último, el número de Mach se calcula dividiendo la velocidad de cada ensayo entre la velocidad del sonido.

En la siguiente página se muestra la tabla con los resultados a diferentes velocidades de ensayo.

Prueba	Pitot	Fuerza modelo	Velocidad	Fuerza dummy	Fuerza Total	Drag	Reynolds	Mach	Flujo
()	dp (mm.c.a)	F (N)	v (m/s)	F (N)	F _D (N)	C _D	Re	Ma	()
1	5	0.15	8.9711	0.01	0.14	1.453648	30375	0.02639	Laminar
2	10	0.25	12.6871	0.05	0.20	1.038320	42957	0.03731	Laminar
3	13	0.31	14.4655	0.10	0.21	0.838643	48979	0.04255	Laminar
4	15	0.35	15.5385	0.12	0.23	0.796045	52611	0.04570	Laminar
5	19	0.46	17.4880	0.18	0.28	0.765078	59212	0.05144	Laminar
6	22	0.5	18.8180	0.21	0.29	0.684347	63716	0.05535	Laminar
7	23	0.52	19.2409	0.21	0.31	0.699737	65148	0.05659	Laminar
8	25	0.58	20.0601	0.25	0.33	0.685291	67921	0.05900	Laminar
9	30	0.69	21.9747	0.31	0.38	0.657602	74404	0.06463	Laminar
10	35	0.76	23.7354	0.38	0.38	0.563659	80365	0.06981	Laminar
11	40	0.86	25.3742	0.45	0.41	0.532139	85914	0.07463	Laminar
12	45	0.97	26.9134	0.50	0.47	0.542234	91126	0.07916	Laminar
13	50	1.09	28.3692	0.59	0.50	0.519160	96055	0.08344	Laminar
14	55	1.15	29.7539	0.65	0.50	0.471964	100743	0.08751	Laminar
15	60	1.29	31.0769	0.71	0.58	0.501855	105223	0.09140	Laminar
16	65	1.34	32.3459	0.81	0.53	0.423315	109519	0.09513	Laminar
17	70	1.47	33.5669	0.87	0.60	0.444994	113654	0.09873	Laminar
18	75	1.51	34.7451	0.92	0.59	0.408406	117643	0.1022	Laminar

Tabla 4: Resultados experimentales ensayo 1.

Dado que el número de Reynolds $Re \leq 2 \cdot 10^5$, todas las pruebas tienen un flujo laminar. Se confirma también que el túnel de viento es de velocidad baja, ya que ningún valor de Mach es mayor de 0,6. Se puede afirmar que no hay compresibilidad del aire ya que $Ma < 0,3$.

A continuación, la gráfica de valores del coeficiente de arrastre:

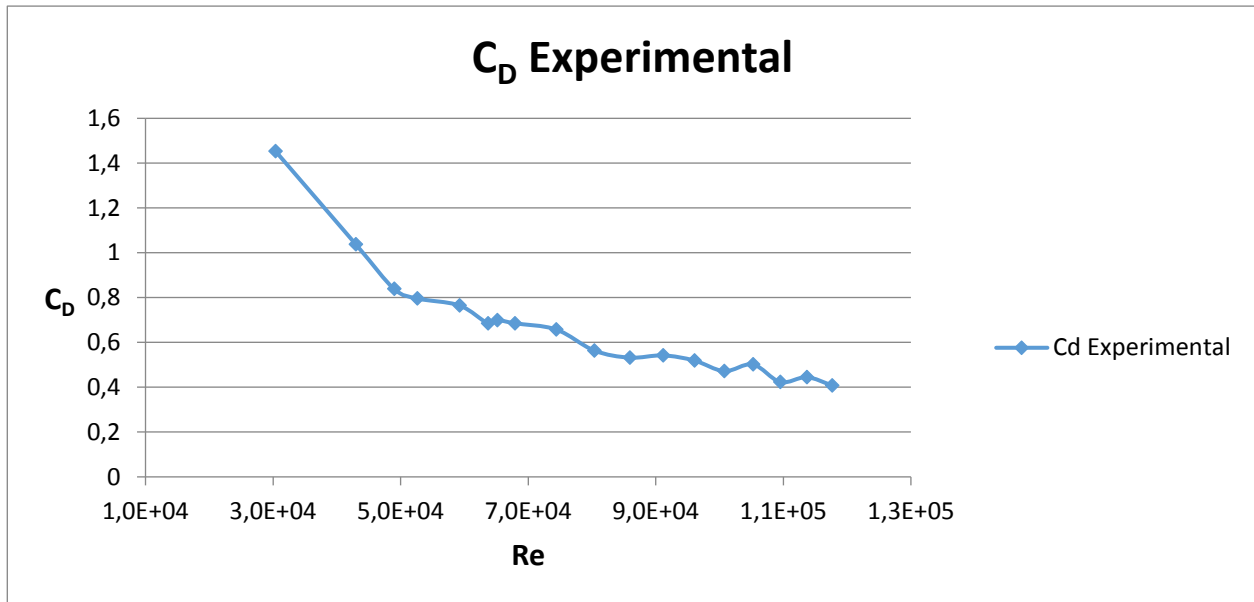


Figura 34: C_D experimental.

El coeficiente de arrastre disminuye, según la teoría, con un incremento del número de Reynolds. La gráfica muestra claramente este descenso. Reynolds es función, entre otros, de la velocidad. Cuanto mayor es la velocidad, mayor es el número de Reynolds. Entonces, si la velocidad tiene un valor elevado, Reynolds también lo tendrá y el c_D disminuirá.

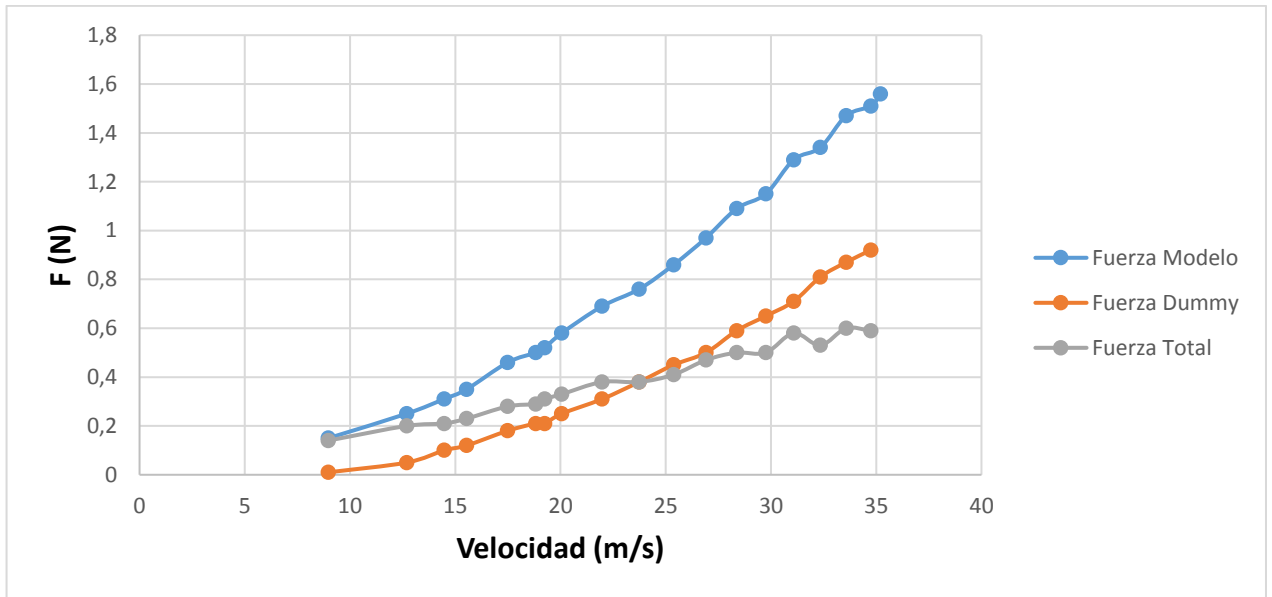


Figura 35: Comparación fuerza modelo, dummy y total.

La fuerza total ejercida por el flujo de aire sobre la esfera lisa, se determina restando la fuerza de la barra dummy, a la fuerza del modelo. En la gráfica se observa, en color verde, la fuerza total ejercida sobre la esfera con un máximo de 0,6N a una velocidad de 35 m/s. Se puede concluir que, a mayor velocidad, mayor es la fuerza de arrastre que recibe la esfera del flujo de aire.

4.5.2 Ensayo 2

Este ensayo se corresponde con el Experimento 2 explicado en el punto anterior. Para una velocidad inicial de 30 m/s, se obtuvieron los resultados de la Tabla 5 y la Gráfica 3:

La velocidad es calculada en función de la densidad, de la altura y de la presión mediante la siguiente fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot 9,81}{\rho}} \quad (4.2)$$

Y (mm)	ΔP (mm H ₂ O)	Y real (mm)	v (m/s)
255	57	61	30.528
250	58	56	30.794
245	60	51	31.321
240	61	46	31.581
235	62	41	31.839
230	63	36	32.094
225	64	31	32.348
220	65	26	32.600
215	65	21	32.600
210	65	16	32.600
205	68	11	33.344
200	69	6	33.588
198	71	4	34.071
196	78	2	35.711
		0	0

Tabla 5: Resultados experimentales ensayo 2.

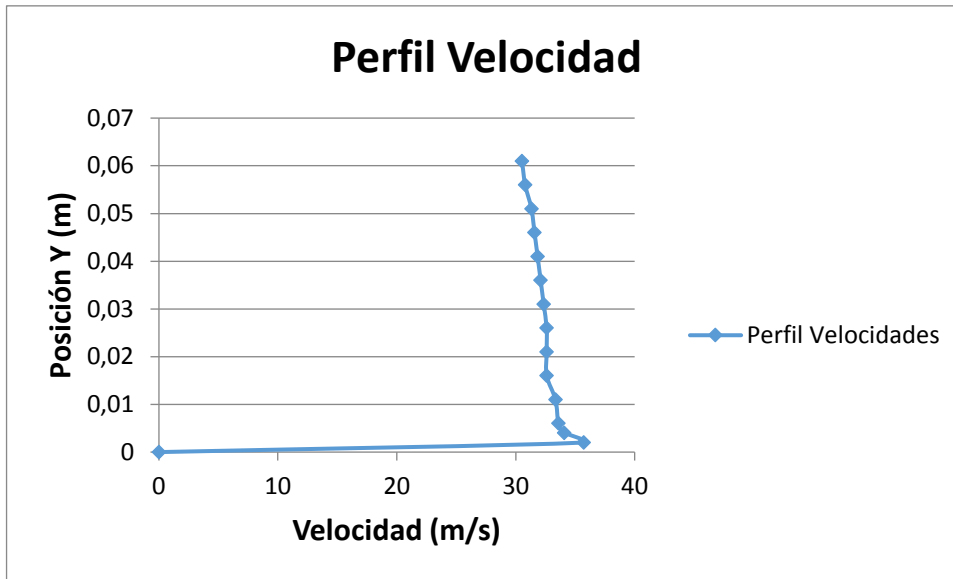


Figura 36: Perfil Velocidad experimental ensayo 2.

Donde Y es la altura respecto al suelo del TdV e Y_{Real} es la altura respecto a la pared superior de la esfera.

Cerca de la pared de la esfera y dentro de la capa límite la velocidad disminuye hasta ser nula en la pared.

Al alejarnos de la pared la velocidad es mayor que la velocidad inicial, debido a la disminución del área de paso del flujo que produce la esfera.

5 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

5.1. Procedimiento

En este punto se especificará el procedimiento seguido en la parte de Dinámica de Fluidos Computacional. Antes, se explicarán los programas utilizados.

- Solidworks (SW)

Solidworks es un software CAD (Computer-Aided Design) para modelado mecánico 2D y 3D.

- Ansys Fluent (AF)

Ansys Fluent es un software de simulación ingenieril desarrollado para trabajar bajo la teoría de elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos.

Ahora sí, se enumerará el procedimiento seguido:

1. Modelaje de la geometría real de la esfera en Solidworks.
2. Exportación del archivo de Solidworks a Ansys Fluent.
3. Comprobación de validez y/o de errores de la geometría en Ansys Fluent.
4. Creación de una malla para la zona de trabajo y otra específica para la esfera. Ambas con la forma y tamaño deseados.
5. Creación de la capa límite alrededor de la esfera.
6. Comprobación de la malla.
7. Ajuste de las condiciones de contorno.
8. Simulación.

Ansys Fluent dispone de varias funciones y pasos a seguir antes de obtener los resultados finales. Este apartado se dividirá en:

- Geometría.
- Malla.
- Configuración.

De la teoría a la práctica surgen siempre imprevistos. En el punto anterior se han definido, a gran escala, los pasos seguidos. En este, se detallarán y explicarán la mecánica y la metodología utilizada con los problemas que han surgido a lo largo de la realización del proyecto.

El programa Ansys Fluent era, en un principio, totalmente desconocido y se realizaron varios tutoriales teóricos y prácticos para su aprendizaje previo.

5.1.1 Geometría

A continuación se exponen las opciones realizadas en orden cronológico hasta llegar a la definitiva:

Opción 1:

El primer paso fue crear la esfera de diámetro 50 mm con Solidworks. A su alrededor se modeló la zona de trabajo del túnel de viento (305 x 305 x 605 mm). El último paso fue hacer un vaciado de la esfera en la zona de trabajo.

Surgió entonces el primer problema. Al exportar la forma creada en SW a AF e intentar crear la malla, AF solo detectaba un cuerpo (y no dos). Hecho que impedía poder mallar por partes separadas la esfera y el rectángulo exterior.

Opción 2:

La segunda opción fue el modelaje directo desde la función *geometría* de Ansys Fluent sin utilizar Solidworks. Se creó la esfera y su zona de trabajo sin problema alguno. En la parte de la malla surgió el mismo problema que en la opción 1.

Opción final:

Dado que ni la opción 1 ni 2 habían funcionado y habían causado diversos problemas, se decidió intentar hacer un mix de ambos. Se modeló una esfera en SW, se exportó a AF y se creó un rectángulo 3D. Ansys Fluent, ahora sí, consideraba ambos cuerpos.

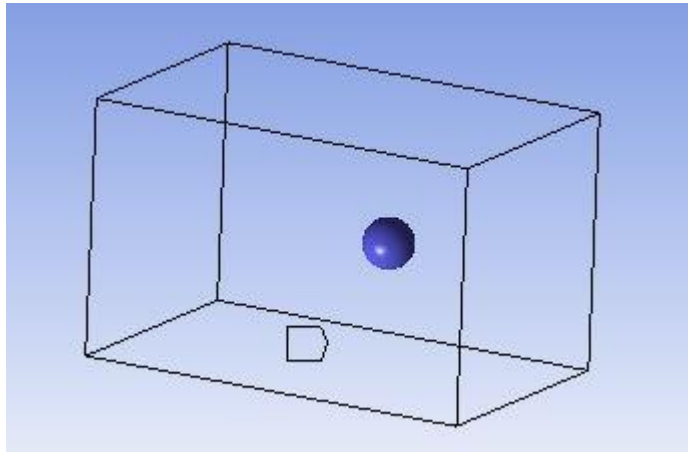


Figura 37: Geometría definitiva.

4.5.3 Malla

Con la geometría ya definida y sin que el programa detectara problema alguno, el siguiente paso fue trabajar desde la función de *malla*. Se dio nombre a cada una de las caras. Se obtuvo:

- Para las paredes:
 - Wall_Down.
 - Wall_Left.
 - Wall_Up.
 - Wall_Right.
 - Inlet.
 - Outlet.
- Para la esfera:
 - Sphere.

Con cada pared y elemento especificado, la malla ya se podía crear. Se modeló una malla para cada pared individual como se hizo también con la esfera, obteniendo los siguientes nombres:

- Face Sizing_Down.
- Face Sizing_Right.
- Face Sizing_Up.
- Face Sizing_Left.
- Face Sizing_Outlet.
- Face Sizing_Inlet.
- Face Sizing_Sphere.

Dos mallas han sido en total las modeladas en este TFG.

Malla 1

Para la primera malla (malla 1) se estableció un *Element Size* de 0,005m para todas las paredes. Para la esfera, donde se tiene que realizar un estudio más detallado y preciso dado que es donde se aprecian más cambios, se estableció 0,0005m.

Introducidas las medidas de cada elemento creado por la malla, se creó un *Face Meshing*. El *Face Meshing* se encarga de re-crear cada elemento de la malla de forma cuadrada, siendo todos homogéneos. Para la esfera se aplica la función *Inflation*. Esta función permite establecer un número determinado de capas límite con una precisión mayor para obtener así unos resultados con mayor precisión. En esta primera simulación, se programaron 10 capas límite con una tasa de crecimiento de 1 siendo la primera de 0,002m.

En las figuras 38 y 39 se muestran la malla y las capas límite de la esfera respectivamente.

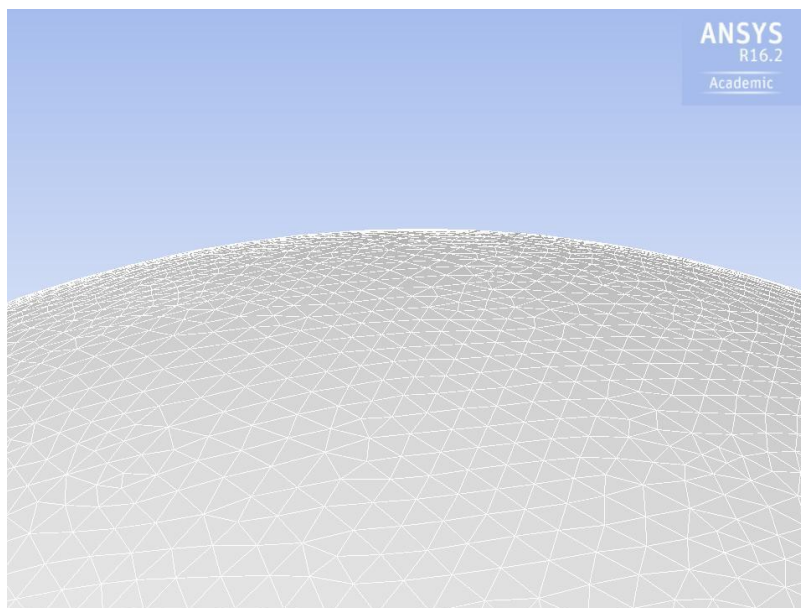


Figura 38: Malla esfera. [Fuente: Ansys Fluent]

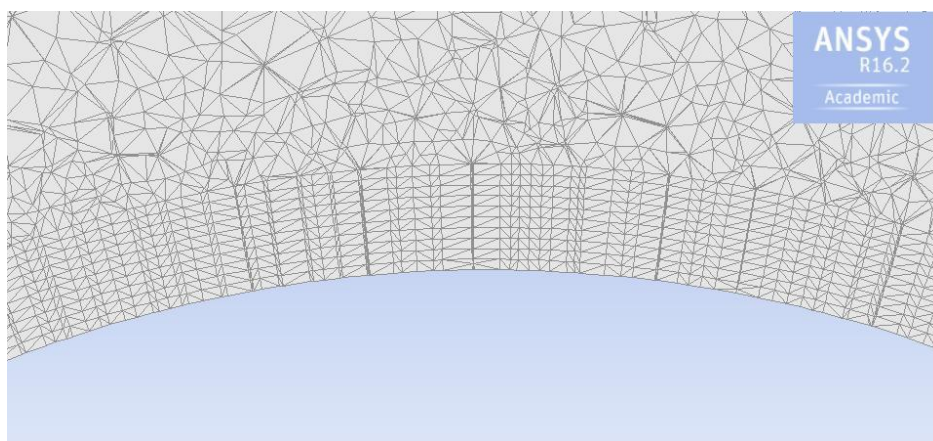


Figura 39: Capa límite 10 capas malla 1. [Fuente: Ansys Fluent]

Malla 2

En la malla 2 se quiso tener una precisión de análisis mayor en la capa límite. Se mantuvieron la medida de los elementos de la malla 1 pero modificaron las capas límites pasando de 10 capas límite que se configuraron en la malla 1, a 20 con una tasa de crecimiento de 1,2.

La imagen de la malla 2 no varía respecto a la figura 38. La figura 40 muestra claramente las 20 capas límites creadas con la función *Inflation*.

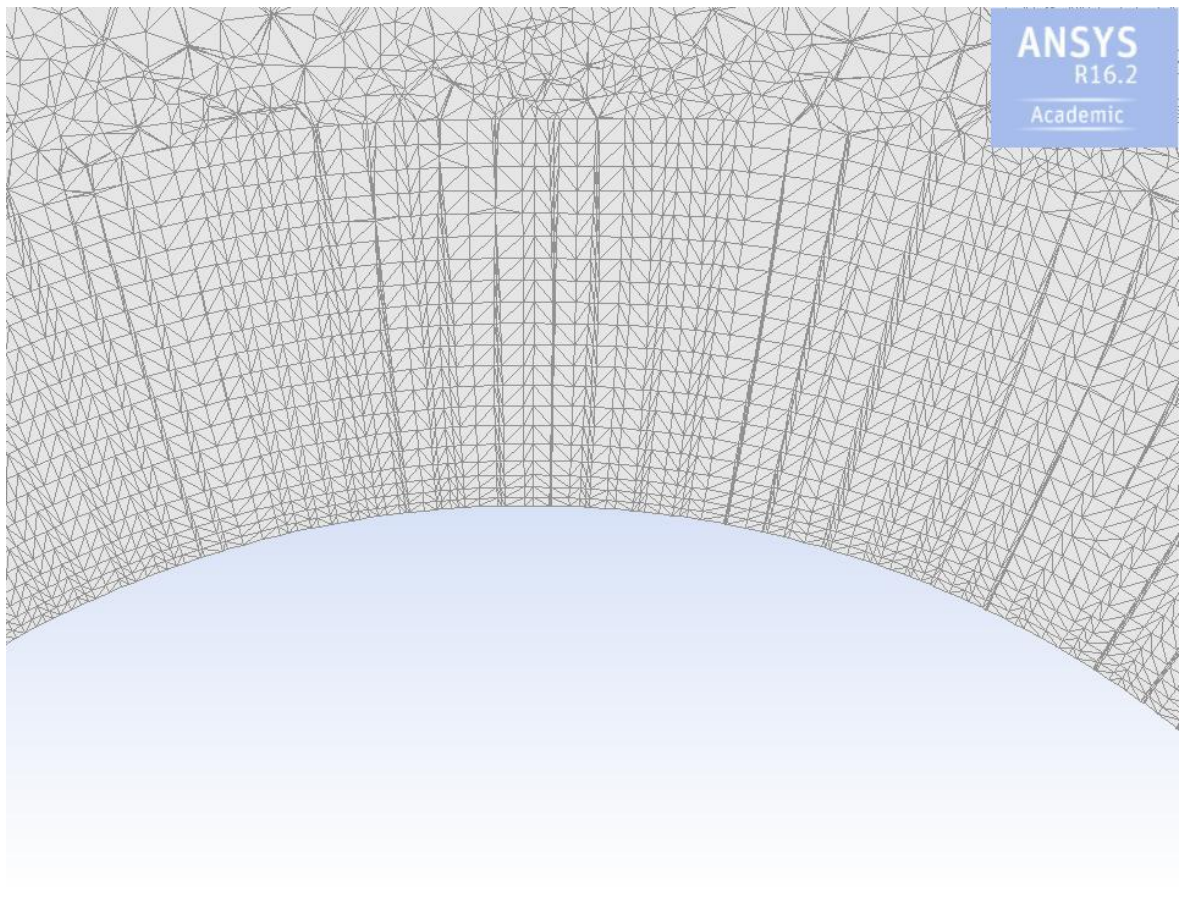


Figura 40: Capa límite 20 capas malla 2. [Fuente: Ansys Fluent]

5.1.2 Configuración

Y por último, antes de poder empezar con la simulación, hay que establecer, con la función *Setup*, unas condiciones de contorno y de trabajo.

Para la malla 1 se configuraron distintas condiciones de trabajo que se exponen a continuación:

- Configuración 1
 - Malla 1.
 - Régimen estacionario.
 - Velocidad: 20 m/s.
 - Modelo turbulencia: Shear Stress Transport (SST).
 - Salto de tiempo: -

- Configuración 2
 - Malla 1.
 - Régimen transitorio.
 - Velocidad: 20 m/s.
 - Modelo turbulencia: Shear Stress Transport (SST).
 - Salto de tiempo: 1×10^{-4} s.

- Configuración 3
 - Malla 1.
 - Régimen transitorio.
 - Velocidad: 20 m/s.
 - Modelo turbulencia: Scale-Adaptive Simulation (SAS).
 - Salto de tiempo: 1×10^{-4} s.

- Configuración 4
 - Malla 1.
 - Régimen estacionario.
 - Velocidad: 30 m/s.
 - Modelo turbulencia: Shear Stress Transport (SST).
 - Salto de tiempo: -

- Configuración 5
 - Malla 1.
 - Régimen transitorio.
 - Velocidad: 30 m/s.
 - Modelo turbulencia: Shear Stress Transport (SST).
 - Salto de tiempo: 1×10^{-4} s.

- Configuración 6
 - Malla 1.
 - Régimen transitorio.
 - Velocidad: 30 m/s.
 - Modelo turbulencia: Scale-Adaptive Simulation (SAS).
 - Salto de tiempo: 1×10^{-4} s.

- Configuración 7
 - Malla 1.
 - Régimen transitorio.
 - Velocidad: 30 m/s.
 - Modelo turbulencia: Scale-Adaptive Simulation (SAS).
 - Salto de tiempo: 1×10^{-5} s.

- Configuración 8
 - Malla 2.
 - Régimen transitorio.
 - Velocidad: 30 m/s.
 - Modelo turbulencia: Scale-Adaptive Simulation (SAS).
 - Salto de tiempo: 1×10^{-4} s.

5.2. Resultados

A continuación se expondrán los resultados obtenidos por CFD. Como ya se ha especificado en el punto anterior, se han realizado varias simulaciones, cada una de ellas con diferentes condiciones de contorno.

Se pueden resumir los resultados en la siguiente tabla:

Configuración	Malla	c (m/s)	Régimen	Modelo Turb.	dt (s)	C_D	C_L	Re
1	1	20	Estacionario	SST	-	0.653122	0	67718
2	1	20	Transitorio	SST	1.00E-04	0.32953	0.00206	67718
3	1	20	Transitorio	SAS	1.00E-04	0.4189	0.002855	67718
4	1	30	Estacionario	SST	-	0.288	0.0037	101576
5	1	30	Transitorio	SST	1.00E-04	0.6495	0.00204	101576
6	1	30	Transitorio	SAS	1.00E-04	0.4053	0.002319	101576
7	1	30	Transitorio	SAS	1.00E-05	0.3774	0.04412	101576
8	2	30	Transitorio	SAS	1.00E-04	0.3711	0,05313	101576

Tabla 6: Resultados Dinámica de Fluidos Computacional.

Comparando ahora con la bibliografía consultada, donde C_d es un valor aproximado a obtenido a partir de las gráficas:

Configuración	Re	Régimen	C_d (CFD)	C_L (CFD)	C_d (Gráfica 1)	C_L (Gráfica 2)
1	67718	Estacionario	0.6531	0	0.50	0.45
2	67718	Transitorio	0.3295	0.002060	0.50	0.45
3	67718	Transitorio	0.4189	0.002855	0.50	0.45
4	101576	Estacionario	0.2880	0.00370	0.40	0.50
5	101576	Transitorio	0.6495	0.000204	0.40	0.50
6	101576	Transitorio	0.4053	0.002319	0.40	0.50
7	101576	Transitorio	0.3774	0.044120	0.40	0.50
8	101576	Transitorio	0.3724	0,05313	0.40	0.50

Tabla 7: Comparación resultados CFD – bibliografía.

Digitalizando los valores de la gráfica de la figura 38, se obtiene la siguiente tabla:

Re	C_d
8.95E+03	3.66E-01
1.17E+04	3.66E-01
1.48E+04	3.95E-01
2.10E+04	4.10E-01
2.86E+04	4.26E-01
3.60E+04	4.43E-01
4.37E+04	4.43E-01
5.73E+04	4.43E-01
8.11E+04	4.26E-01
1.00E+05	4.10E-01

Tabla 8: Re – C_d

Para $Re = 67718$, interpolando se obtiene:

$$y = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1) + y_1 = \frac{67718 - 5,73 \times 10^4}{8,11 \times 10^4 - 5,73 \times 10^4} (0,426 - 0,443) + 0,443 =$$

$$C_D = 0,4356$$

Para $Re = 101576 \approx 1 \times 10^5$, $C_D = 0,410$

Las figuras 41 y 42 han sido extraídas de diferente bibliografía con el objetivo de comparar el coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds experimental y bibliográfico.

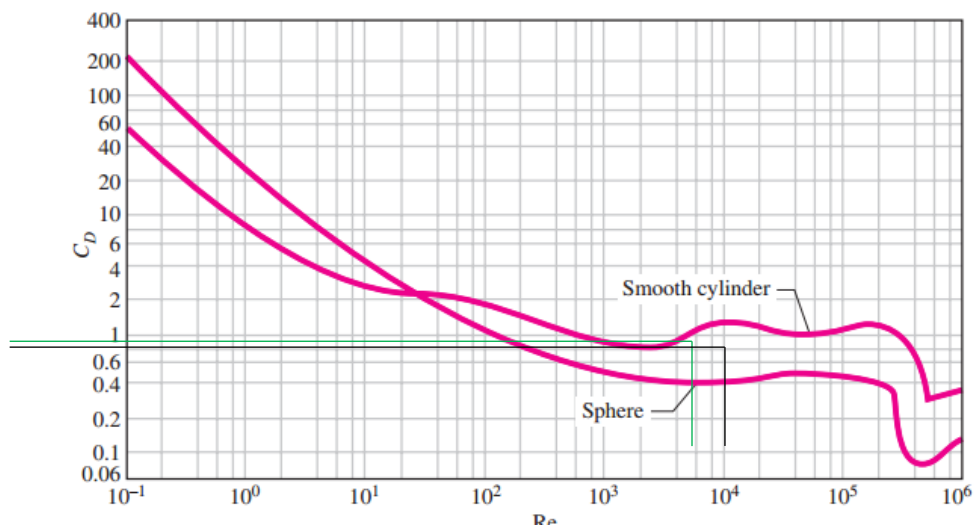


Figura 41: $C_D - Re$. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

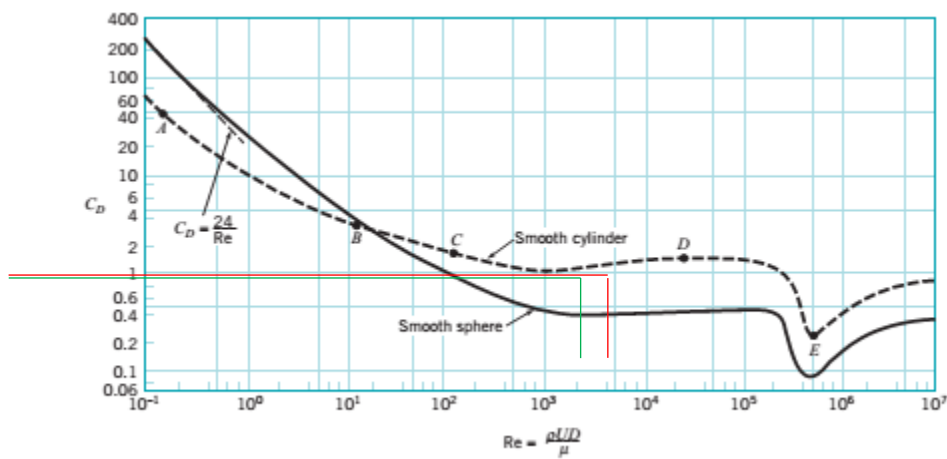


Figura 42: $C_D - Re$. [Fuente: Capa límite]

5.2.1 Coeficientes de arrastre y sustentación

- Velocidad 20 m/s

El régimen estacionario implica una independencia de los cambios respecto al tiempo. Es por este motivo que, en la configuración 1, el coeficiente de arrastre a considerar es el último valor obtenido en la simulación.

En la gráfica de la figura 43 se observan unos máximos y mínimos al principio que finalmente se estabilizan hasta llegar al valor final del $C_D = 0,6531$.

El coeficiente de sustentación C_L se puede considerar 0 debido al régimen estacionario.

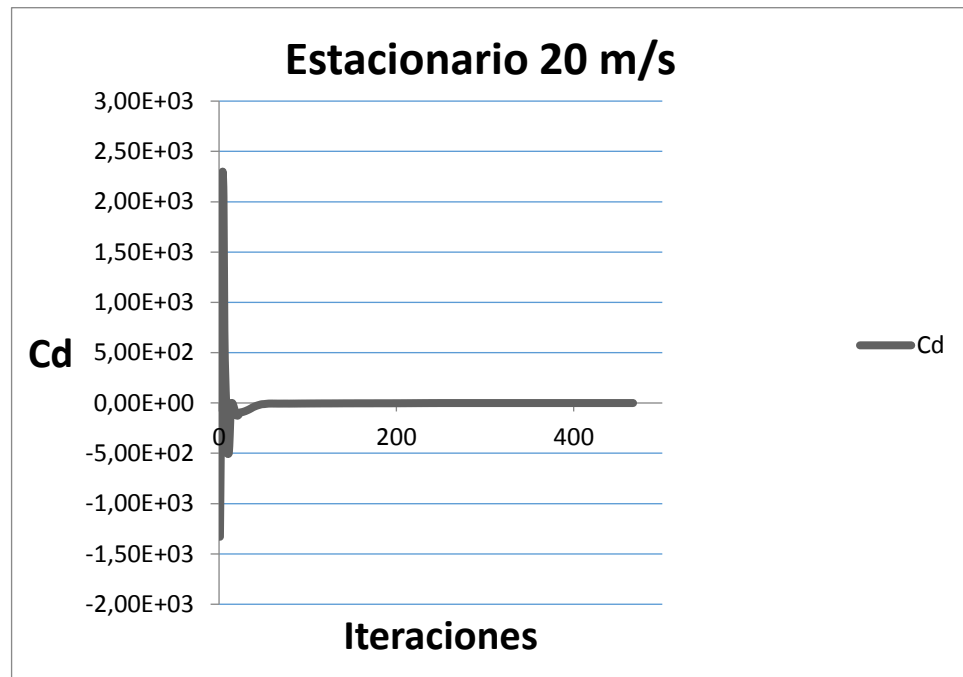


Figura 43: Gráfica C_D Configuración 1.

La distinción entre la configuración 1 y la 2 recae en el tipo de estado. Se pasa de régimen estacionario a transitorio, es decir, los cambios sí son función del tiempo. Esta variación juega un papel importante en la simulación y se aprecia en el valor final de los coeficientes de arrastre y sustentación.

Como se observa en la tabla de resultados 6, los valores de C_D y C_L a misma velocidad pero distinto régimen, no tienen semejanza alguna. En cambio, manteniendo tipo de régimen y el salto de tiempo pero cambiando el modelo de turbulencia, la diferencia de valores es mucho menor como se da entre las configuraciones 2 y 3 donde C_D y C_L tienen valores más cercanos.

- Velocidad 30 m/s

La primera simulación con 30 m/s vuelve a tener régimen estacionario y, al igual que pasó con velocidad 20 m/s y régimen estacionario, los coeficientes distan mucho de las otras pruebas realizadas en régimen transitorio.

En este punto, se establecen ya el modelo de turbulencia a utilizar y el salto de tiempo. Comparando las gráficas de las configuraciones 6 y 7, donde solo varía el salto de tiempo, se observa una estabilización aproximadamente a partir del intervalo de tiempo aproximadamente a la mitad y con unos valores finales muy cercanos del coeficiente de arrastre. Por otro lado, destaca la variación en de los coeficientes de sustentación.

El modelo de turbulencia SAS, en comparación con el SST, se adapta mejor a las condiciones de contorno y ofrece unos resultados con mayor precisión en este contexto.

Los valores negativos de ambos coeficientes son debidos a la dirección del flujo. En cualquier caso, serán utilizados en valor absoluto.

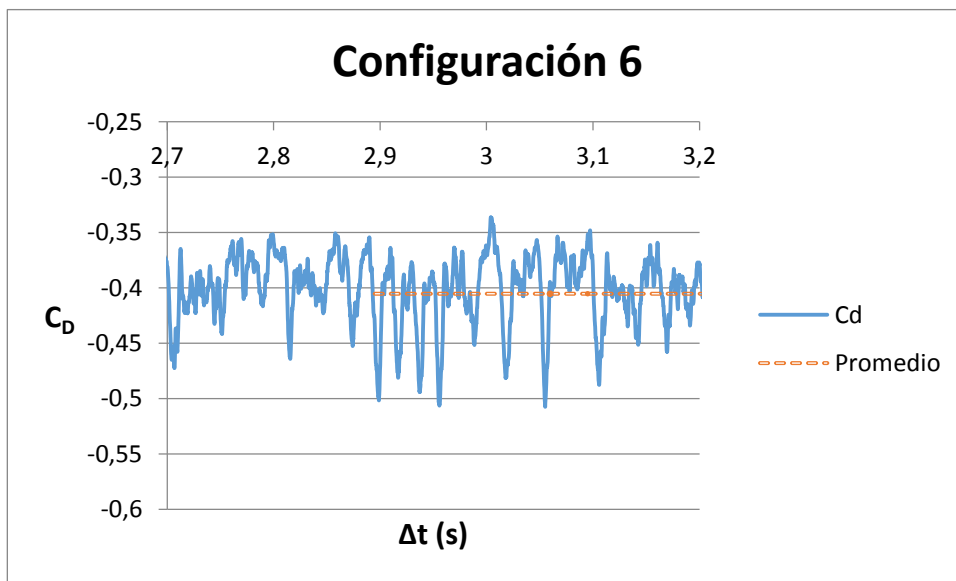


Figura 44: Gráfica C_d Configuración 7.

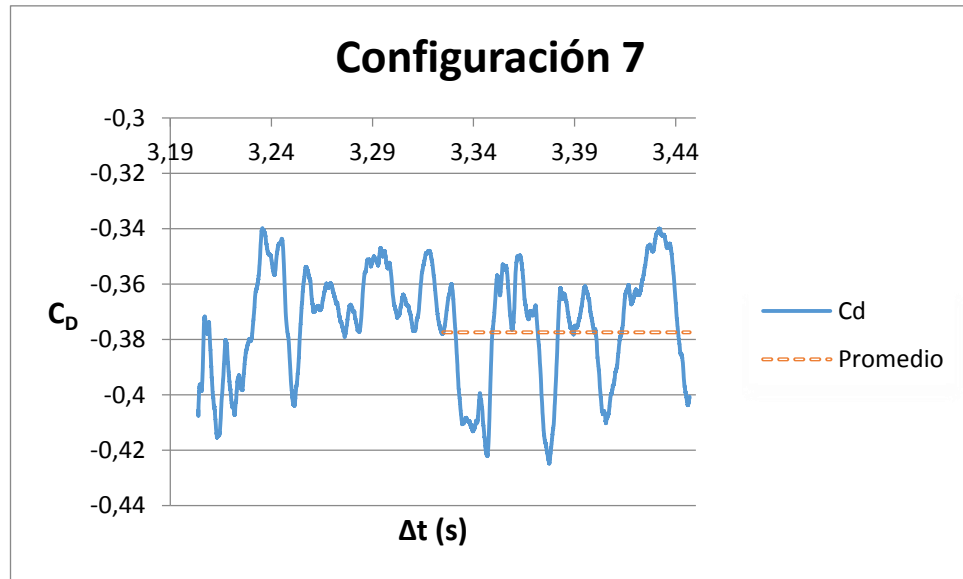


Figura 45: Gráfica C_D Configuración 8.

La última gráfica del coeficiente de arrastre corresponde a la configuración 8, es decir, a la simulación realizada con la malla 2 donde el valor final del C_D es de 0,3711 que es muy parecido al de la configuración 8. Se podría concluir entonces que el coeficiente de arrastre de la esfera estudiada es de 0,3711.

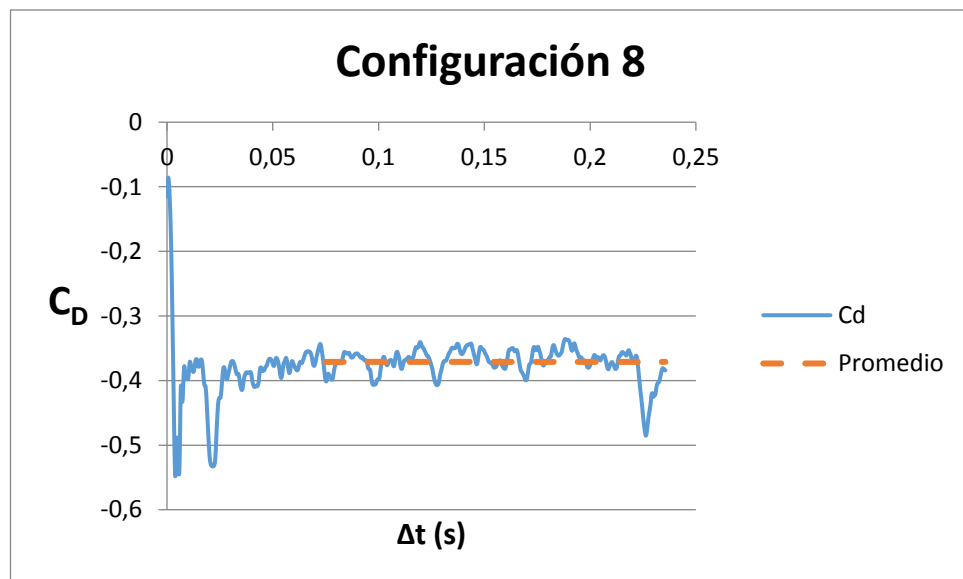


Figura 46: Gráfica C_D Configuración 9.

En el punto 5.2 se han expuesto los resultados experimentales realizados con el TdV. Si se comparan con los computacionales, se llega a esta gráfica:

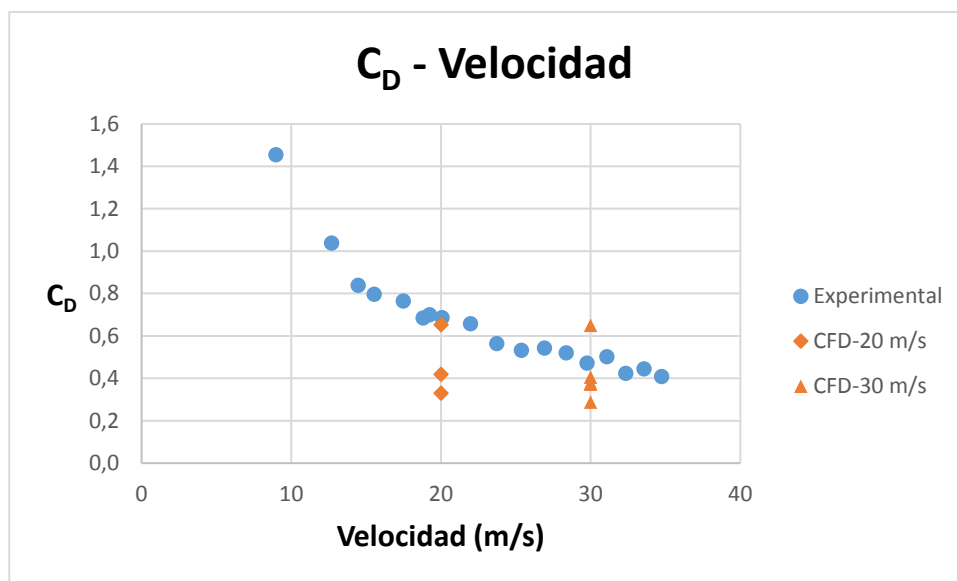


Figura 47: Gráfica Comparativa Velocidad CFD – Experimental.

Obviando la línea de trazado del coeficiente de arrastre experimental para así tener una visión más clara, se observa que, para una velocidad de 20 m/s, el valor coincidente en ambos experimentos es 0,65 aproximadamente y corresponde a la configuración 1 de la simulación CFD. Recordando la configuración 1, se trata de un régimen estacionario con modelo de turbulencia SST. Hecho que destaca, ya que los valores en régimen transitorio están bastante alejados cuando deberían ser estos, los dependientes del tiempo, los que se acercaran más a los resultados experimentales.

A velocidad de 30 m/s, la configuración 1 se aleja de coincidir con el C_D experimental pero la configuración 7 (régimen transitorio, modelo turbulencia SAS y salto de tiempo de 1×10^{-5} s) coincide casi totalmente con el número experimental.

Añadiendo ahora la forma obtenida en la bibliografía,

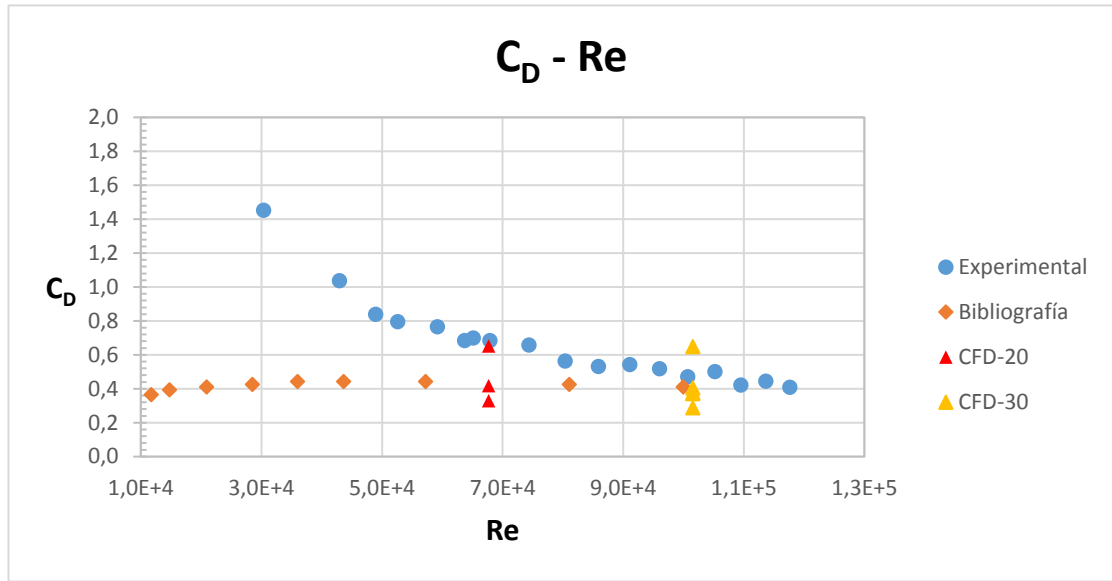


Figura 48: Gráfica Comparativa número Reynolds CFD – Experimental.

se observa que, los valores de CFD con régimen transitorio sí son coincidentes con los bibliográficos para 20 m/s pero no con los experimentales. Para 30 m/s ($Re \approx 101576$), tanto los valores experimentales como los computacionales y bibliográficos coinciden, no exactamente, pero sí con una similitud bastante razonable.

5.2.2 Perfiles de velocidad

Los perfiles de velocidad muestran la distribución de velocidad en un área transversal normal a la dirección de flujo. En este apartado se expondrán las comparativas de los perfiles de velocidad de las configuraciones 1, 2, 6, 7 y 8.

En primer lugar se hace una comparación de los perfiles de velocidad de las configuraciones 1, 2 y 3 que, tienen todas la misma velocidad de 20 m/s, pero solo dos de ellas mismo régimen. Hecho que no ha influido en la forma del perfil de velocidades de las tres configuraciones mostradas. A pesar de no ser exactamente igual, la semejanza es lo suficientemente elevada como para considerarlas iguales.

En el caso de los modelos de turbulencia SST, los perfiles de velocidad coinciden al 100%. Motivo por el cual el perfil estacionario se ha dibujado con líneas discontinuas para poder ver que hace el mismo recorrido que el Transitorio SST.

La única diferencia entre las tres configuraciones sería la pendiente y velocidad máxima que alcanzan. En el caso del modelo de turbulencia SAS, la velocidad alcanzada es menor y, por consecuencia, la pendiente mayor y viceversa en las configuraciones con modelo de turbulencia SST.

Las tres configuraciones tienen velocidad 0 en contacto con la superficie de la esfera.

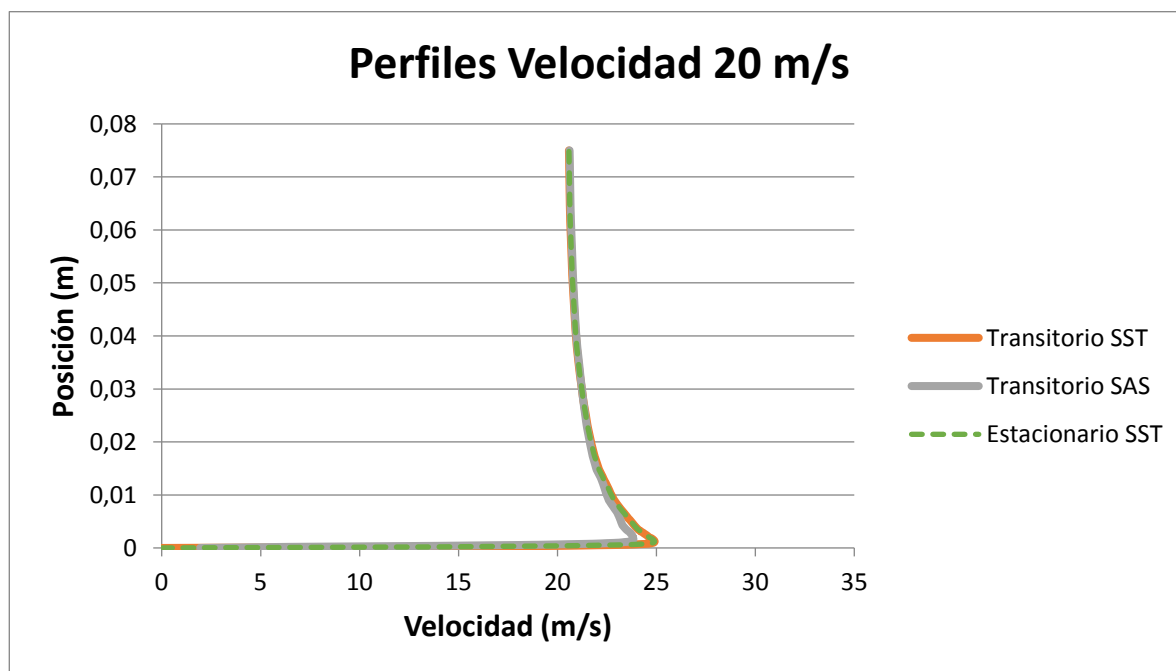


Figura 49: Gráfica Perfiles Velocidad 20 m/s.

Como se explicó en el apartado de Fundamentos Teóricos, cuanto más se acerca el flujo a la pared, mayor es la velocidad hasta que, en contacto con la esfera, la velocidad es de 0 m/s. Este fenómeno corrobora la condición de no-deslizamiento de Euler que define que la velocidad de un fluido en la pared es nula.

Si ahora se comparan todos los perfiles de velocidad en régimen transitorio obtenidos con la malla 1,

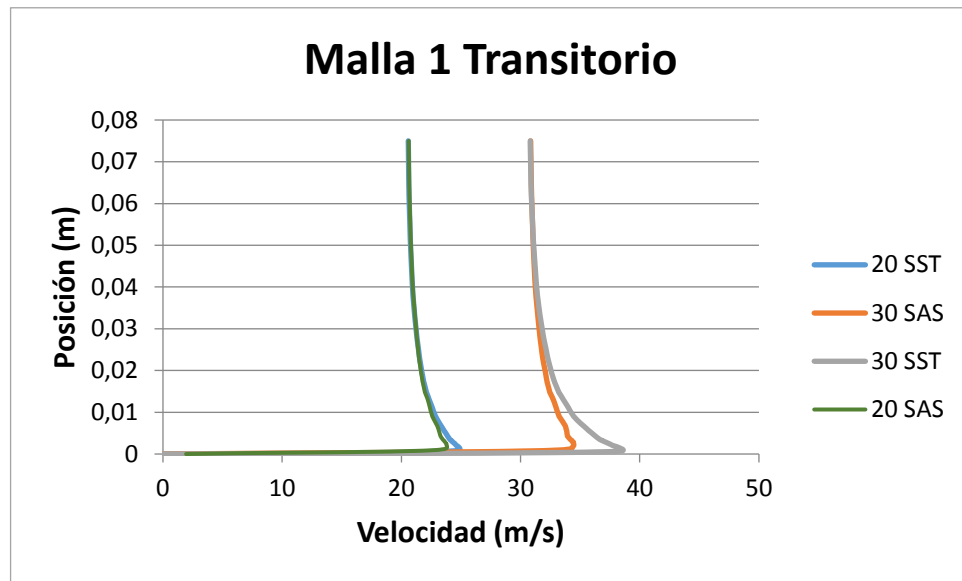


Figura 50: Gráfica Velocidades Malla 1.

se observa que los cuatro perfiles tienen una forma parabólica casi exacta. Para las dos configuraciones con modelo de turbulencia igual (SST), el perfil de velocidad es idéntico hasta la posición aproximada de 0,01m donde la pendiente del perfil de 30 m/s es ligeramente menor que la del perfil de 20 m/s.

Para las configuraciones con modelo SAS, la similitud es mayor, siendo su forma exactamente igual a diferentes velocidades.

Como era de esperar, también cumplen la condición de no-deslizamiento de Euler.

Comparando ahora los perfiles de velocidad experimentales y computacionales para 30 m/s:

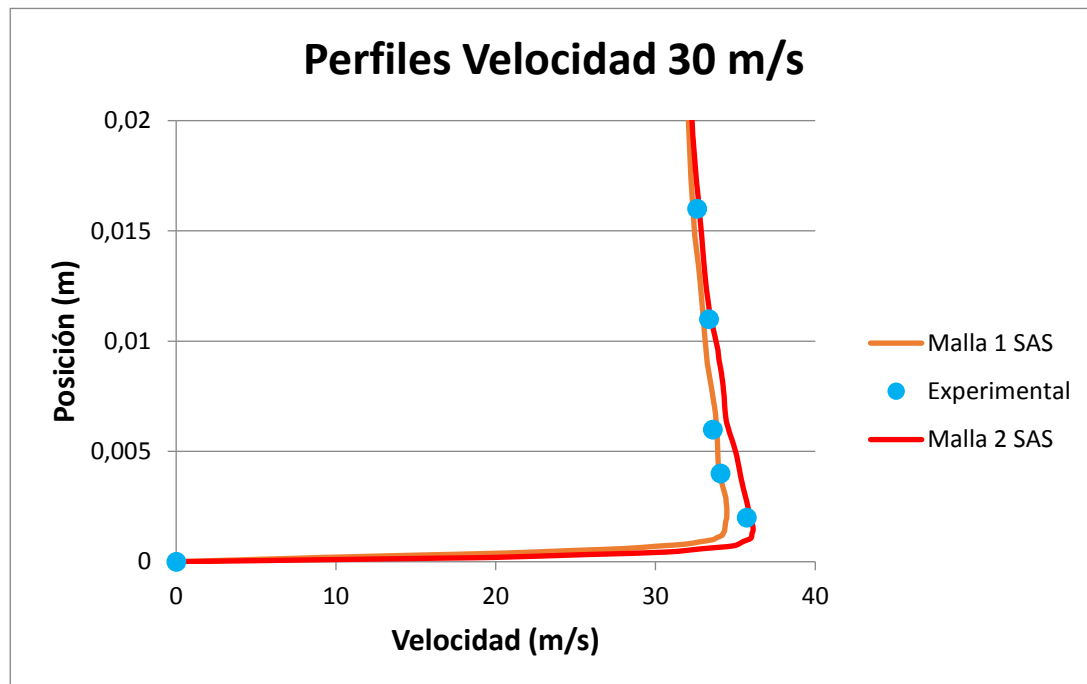


Figura 51: Gráfica Perfiles Velocidad 30 m/s.

Llegado a este punto, se exponen, de la malla 1 a 30 m/s, los resultados de la configuración con modelo de turbulencia SAS; la malla 2, también a 30 m/s, con su única configuración; y el resultado obtenido experimentalmente.

Los tres perfiles de velocidad tienen una forma muy parecida. En cuanto a valores numéricos, la malla 2 alcanza una velocidad de unos 36 m/s en el punto de máxima cercanía a la capa límite antes de ser nula; la malla 1, de unos 35 m/s; y, por último, el valor experimental coincide en velocidad con la malla 1 pero en diferente punto, es decir, llega a su velocidad máxima en un punto más alejado de la esfera en comparación con la simulación de la malla 2.

La gráfica de la figura 51 corrobora la validez de las simulaciones y del ensayo, ya que se podría decir que, los valores numéricos y el experimental tienen un margen de error aceptable.

Para poder hacer un comentario de manera más extensa y documentada, se adjuntan a continuación imágenes recreadas con Ansys Fluent donde se podrán observar los cambios de velocidad del flujo debidos a la presencia de la esfera.

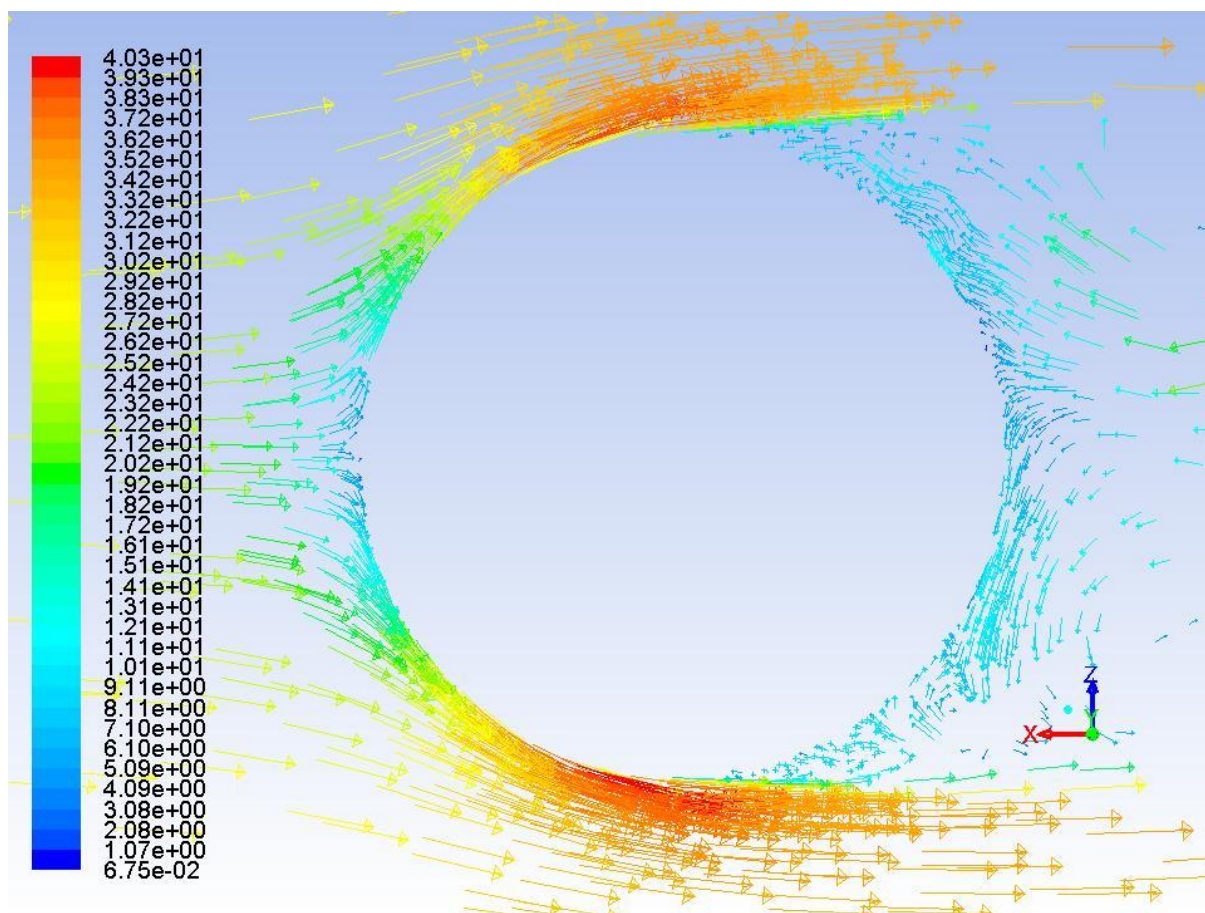


Figura 52: Velocidad Plano Y Transitorio 30 SAS.

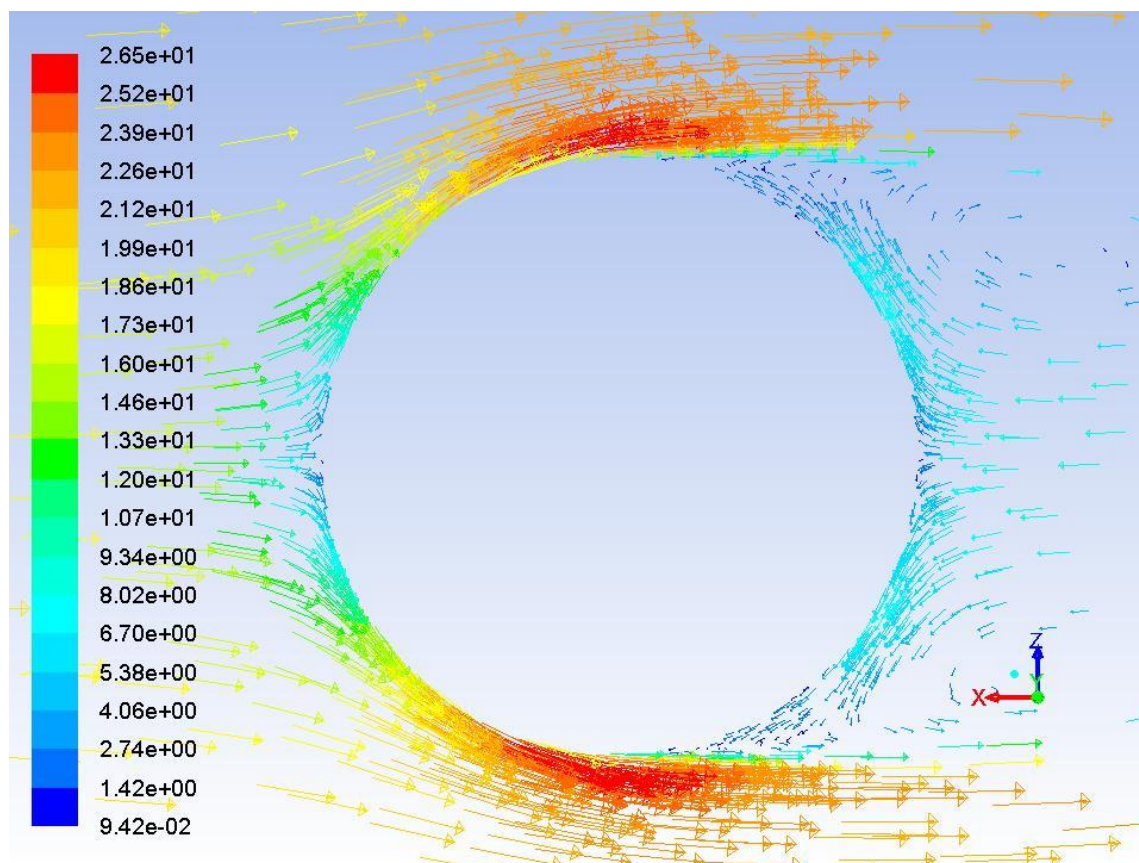


Figura 53: Velocidad Plano Y Transitorio 20 SST.

Se comparan ahora las dos imágenes de velocidades. La primera (Figura 52) corresponde a la configuración 6 y la segunda (Figura 53) a la configuración 2.

En ambos casos, el flujo tiene la velocidad inicial establecida y, con la presencia de la esfera, este se modifica de manera que, cuanto más se acerca a la esfera, mayor es su velocidad hasta llegar a la capa límite donde la velocidad es 0 como determina Euler. Justo en el punto donde empieza la separación, donde la presión es menor, el flujo alcanza su velocidad máxima hasta que finalmente se separa y empieza a, por una parte, reestablecerse y, por otra, entra en la zona de mayores turbulencias (véanse figuras 54 y 55).

La diferencia de valores y de color en las imágenes se debe al modelo de turbulencia elegido para cada simulación. En el caso de la configuración 7 se trata del modelo de turbulencias *Scale-Adaptive Simulation* que está basado en la escala de Karman, en cambio, la configuración 2 tiene el modelo de turbulencia Shear Stress Transport que combina los modelos $k-\epsilon$ y $k-\Omega$ ¹.

A pesar de tener diferentes modelos de turbulencia, se observa en ambas imágenes que la zona de mayor intensidad de turbulencias no se encuentra justo en la parte donde se separa el flujo sino unos milímetros más alejados. El porqué de este fenómeno se debe a que los vórtices son al principio estacionarios pero, a medida que crecen, cambian en el tiempo y generan altas intensidades de turbulencias.

¹ Para más información consultar Yumusa A. Çengel & John M. Cimbala (2006). *Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición*.

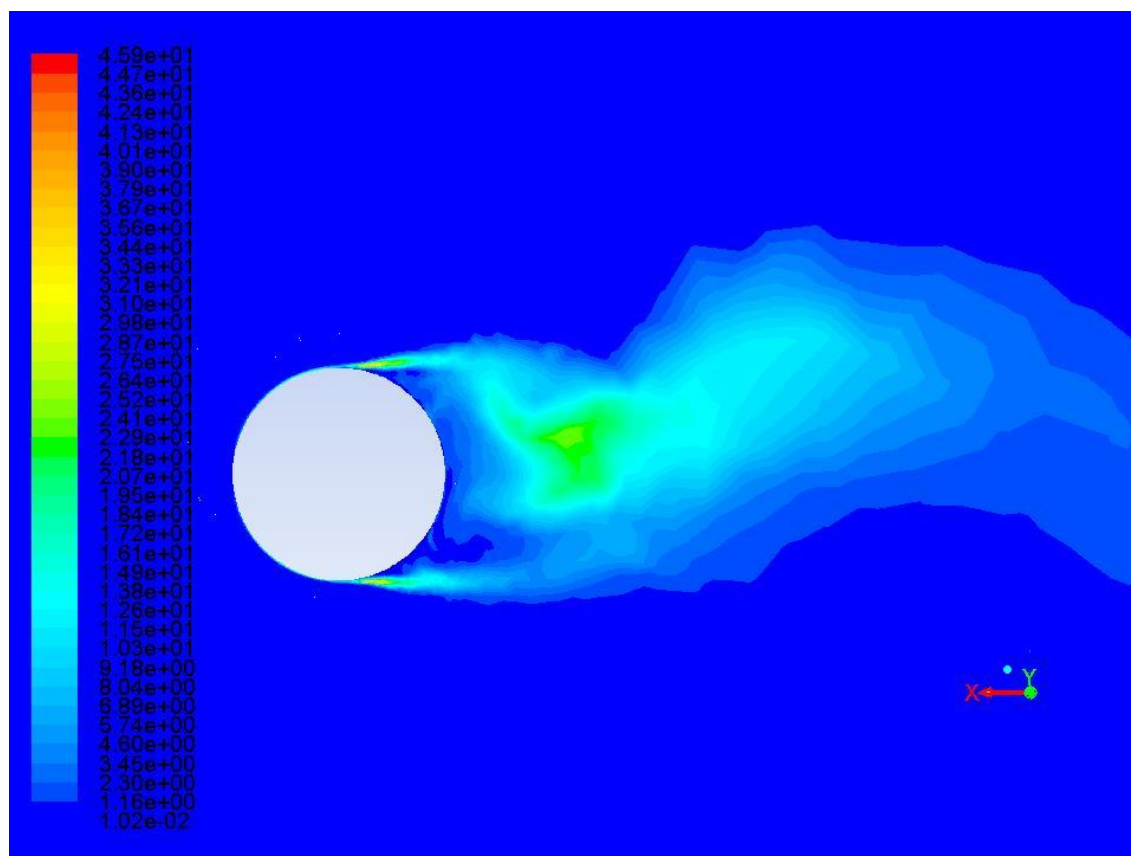


Figura 54: Turbulencia Plano Y Configuración 7.

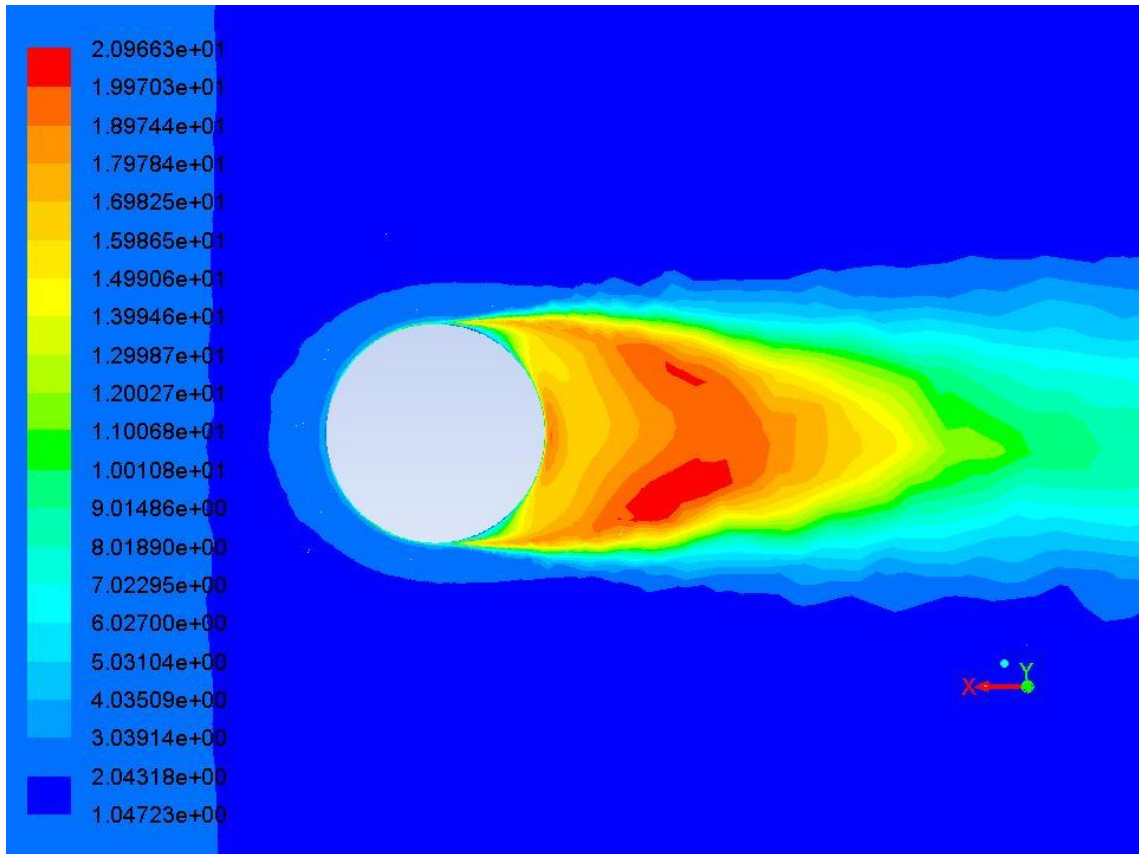


Figura 55: Turbulencia Plano Y Configuración 2.

En la siguiente figura, correspondiente a la malla 2, se observa claramente una delgada línea azul oscuro rodeando el perímetro de la esfera. En el eje situado en la parte izquierda de la imagen, el color azul oscuro indica una velocidad de 0 m/s. Teoría de no-deslizamiento de Euler corroborada.

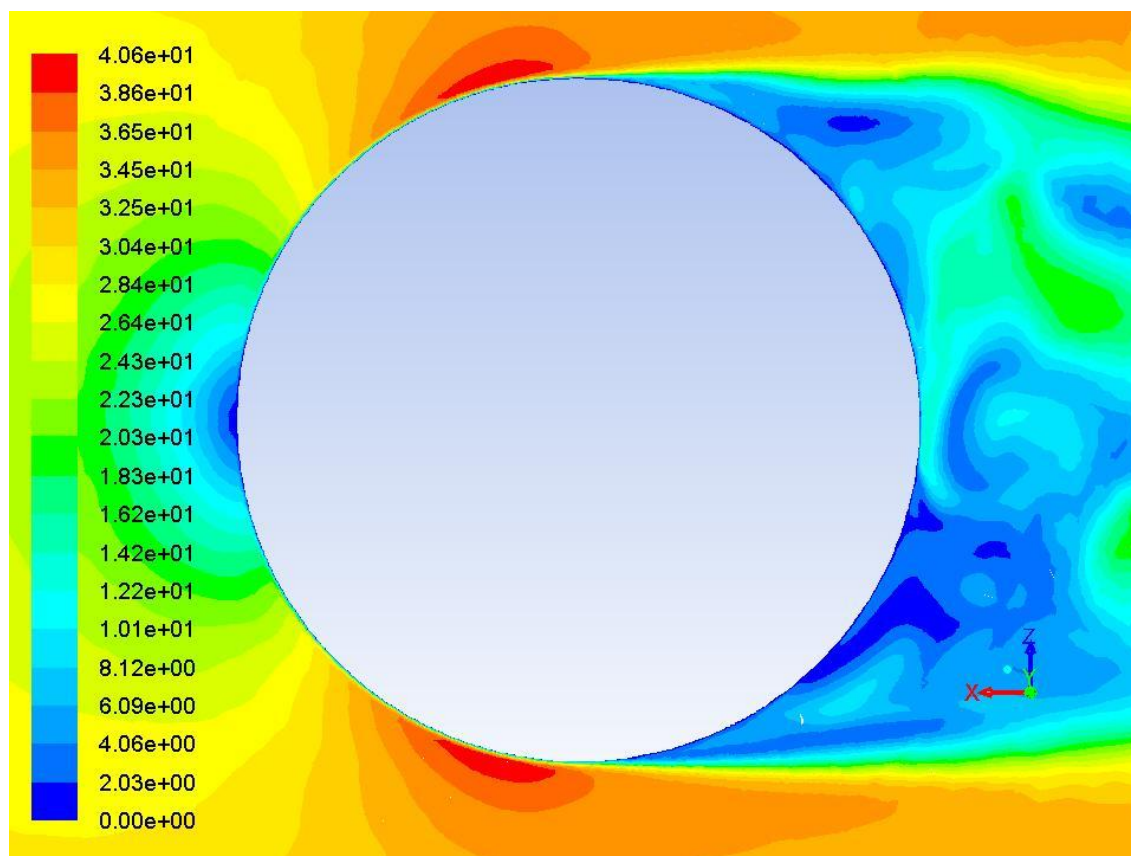


Figura 56: Velocidad Plano Y Configuración 9.

En la Figura 56 se aprecia que, para una velocidad de 30 m/s, el desprendimiento de la capa límite se produce antes de llegar al centro de la esfera. Tal como se muestra en la bibliografía (3.4.3), este comportamiento corresponde a un flujo laminar y al valor del Reynolds del flujo estudiado, $Re=1,02 \cdot 10^5$.

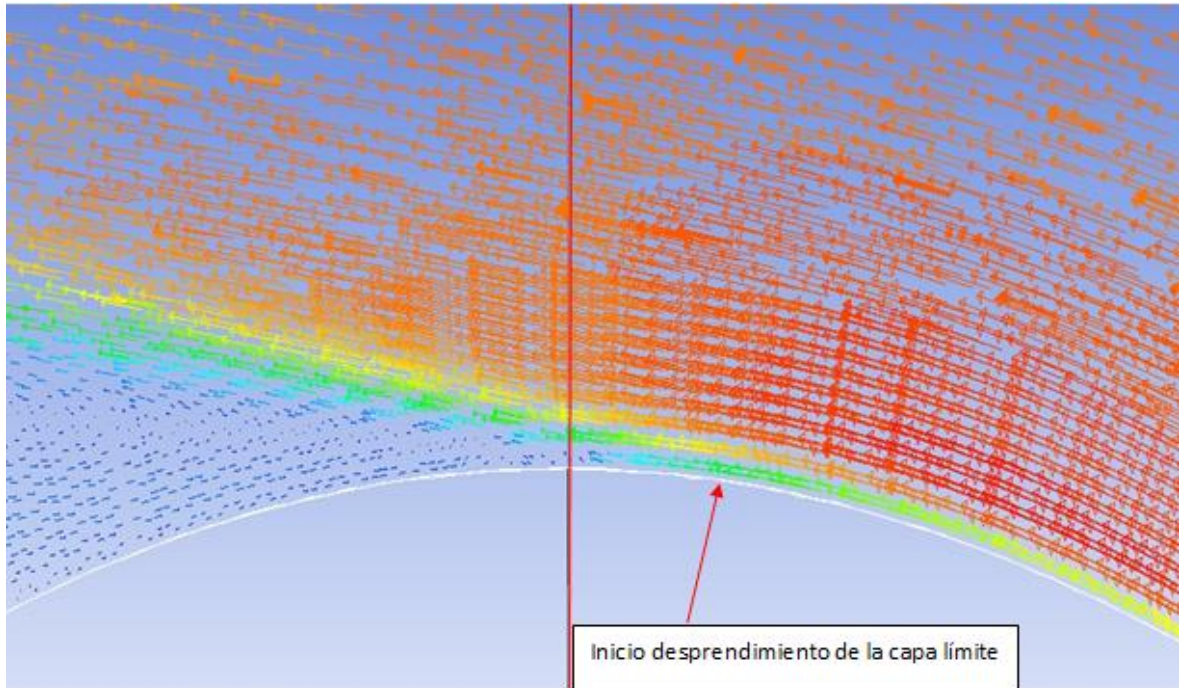


Figura 57: Desprendimiento de la capa límite. 30 m/s. SAS.

Llegado al punto de desprendimiento de la capa límite, existe una desaceleración del flujo y un aumento de presión. Hecho que produce que los elementos más cercanos a la pared retrocedan como se observa en la figura 58. La flecha roja indica el inicio del desprendimiento de la capa límite y la verde los elementos de flujo más cercanos a la pared retrocediendo.

El desprendimiento de la capa límite produce una zona de menor presión y aumenta la fuerza de arrastre. Este desprendimiento se debe al gradiente adverso de presión, es decir, la presión aumenta lentamente en la dirección del flujo.

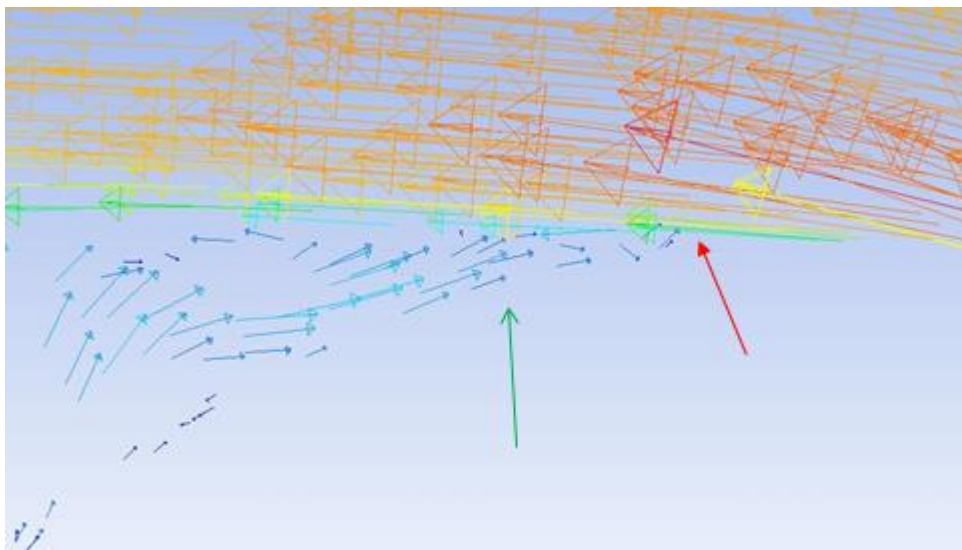


Figura 58: Vectores Velocidad retrocediendo debido punto desprendimiento.

5.2.3 Presiones

En el apartado de fundamentos teóricos se definió que, si un fluido no-viscoso y/o irrotacional externo a la capa límite acelera, $U(x)$ aumenta y $P(x)$ disminuye. Entendiendo con esto que, a mayor velocidad menor presión y viceversa.

Empezando con imágenes de la configuración 1 donde se simuló a una velocidad de 20 m/s en estado estacionario, se observan, tanto en el plano Y como en el plano Z, cambios de presión debido a la presencia de la esfera que tienen una forma bastante uniforme, es decir, no existe una gran alteración como se verá en las imágenes con estados transitorios.

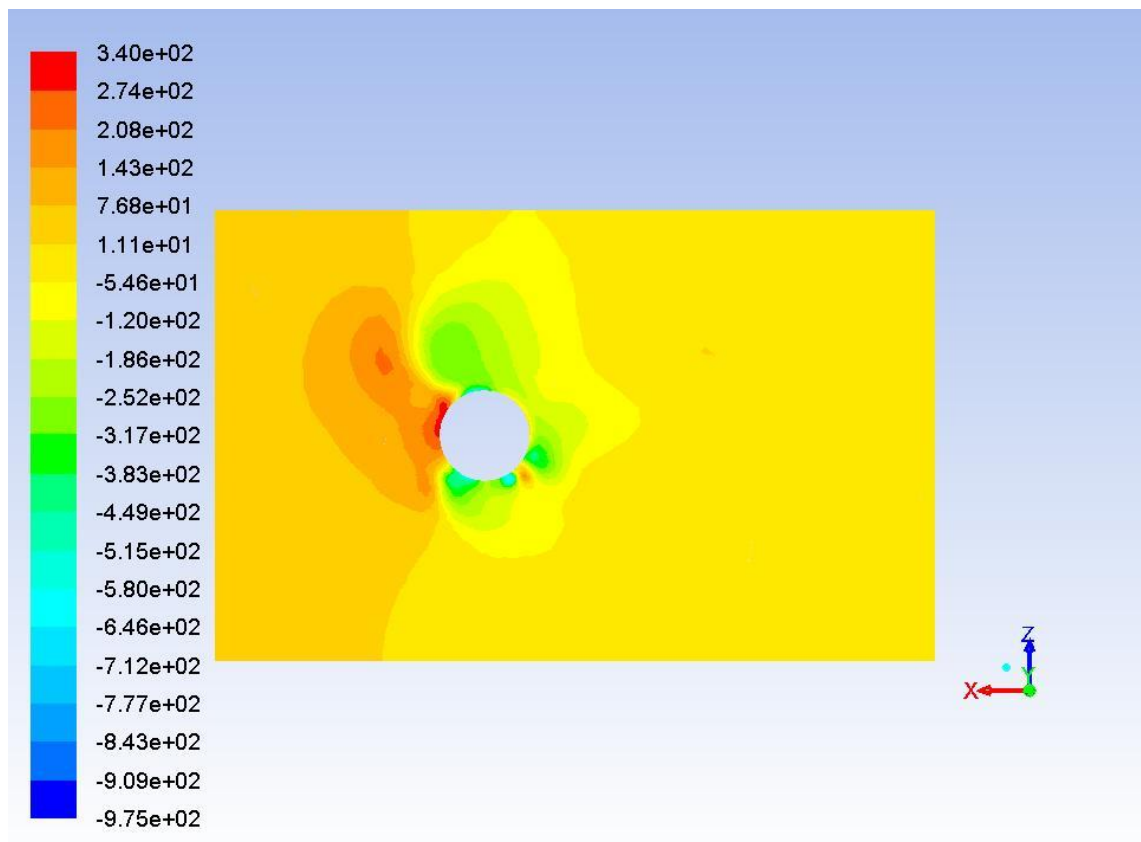


Figura 59: Presión Plano Y Transitorio 20 m/s.

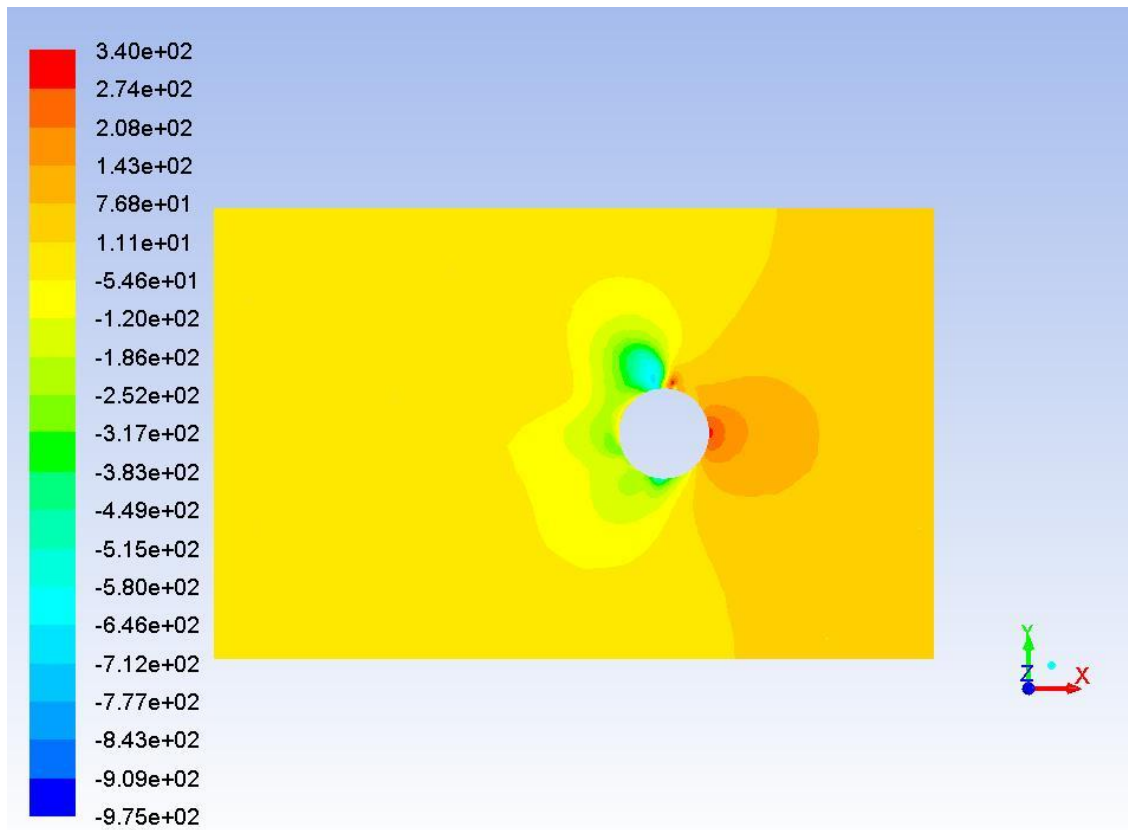


Figura 60: Presión Plano Z Transitorio 20 m/s.

Las siguientes imágenes, correspondientes a la configuración 6, corroboran la teoría de la relación velocidad-presión, dado que se ve claramente cómo en los puntos donde la presión es menor. En el punto medio de la cara frontal de la esfera, el flujo se ve obstruido por la presencia del objeto, se acelera y lo rodea. Justo en la zona de desviación del flujo, la velocidad es 0 en la capa límite y la presión alcanza su máximo valor. En el punto de separación, la velocidad es máxima (zona roja) con valores de aproximadamente 40 m/s y la presión es mínima (zona azul).

En la parte posterior de la esfera, en la zona de turbulencia, se crea una estela. Esta produce una disminución de la velocidad y de la presión al contrario que la intensidad de turbulencia que, como se ha comentado en el punto anterior, alcanza valores máximos.

A medida que la corriente del flujo se reestablece y pasa la zona de turbulencias, la velocidad y la presión vuelven poco a poco a sus valores iniciales.

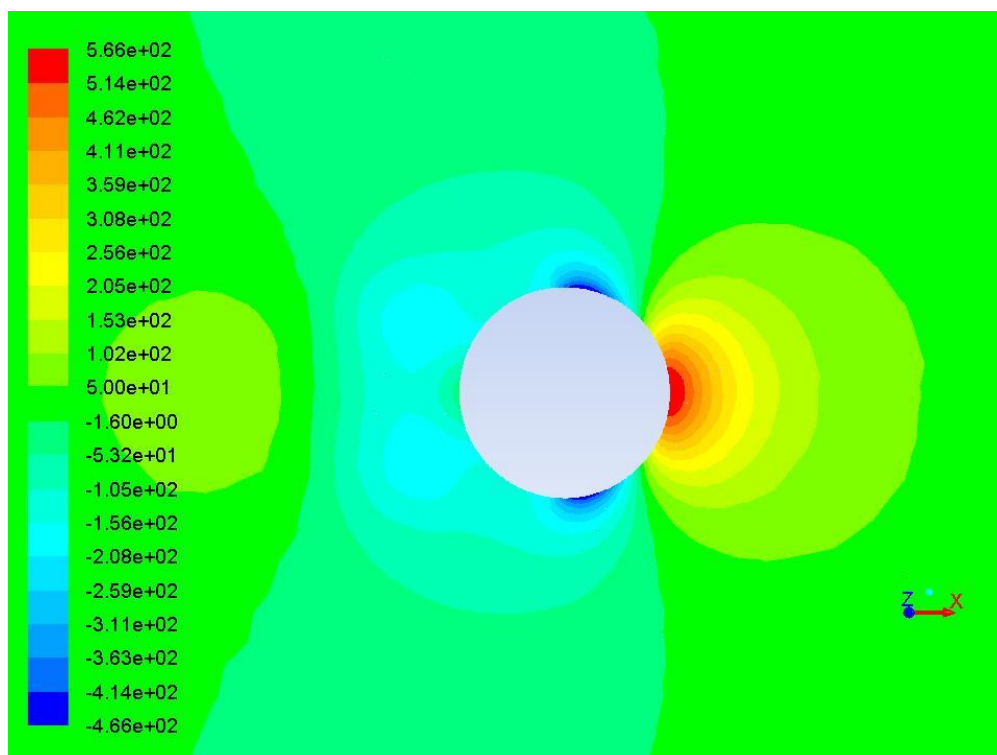


Figura 61: Presión Plano Z Transitorio 30 SST.

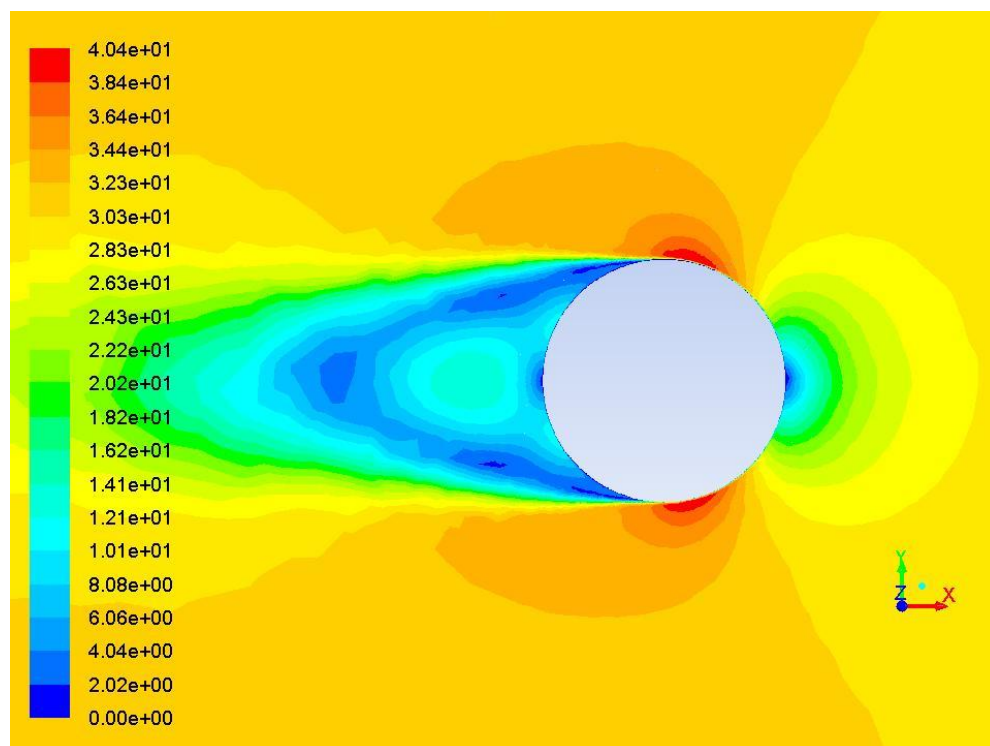


Figura 62: Velocidad Plano Z Transitorio 30 SST.

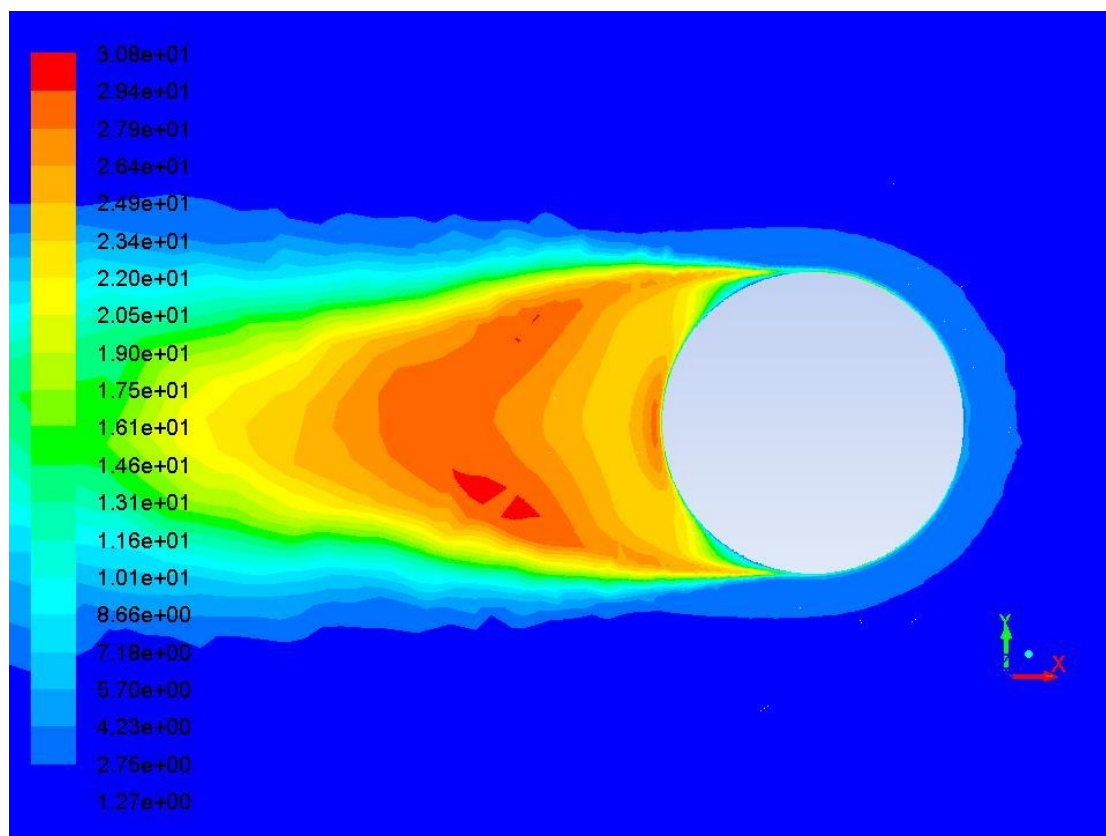


Figura 63: Turbulencia Plano Z Transitorio 30 SST.

Considerando ahora las imágenes de presión obtenidas por las configuraciones 6 y 7, se observa una gran similitud con la configuración 4 comentada anteriormente. En la Figura 64 y Figura 65 se muestran las presiones estáticas en el plano $Z=0$, en la parte posterior, hay una zona de baja presión (punto azul oscuro), que como puede verse en la Figura 66, corresponde con una zona de la estela de alta vorticidad.

En el punto justo antes del desprendimiento de la capa límite, se observa también un aumento de presión (puntos azules)

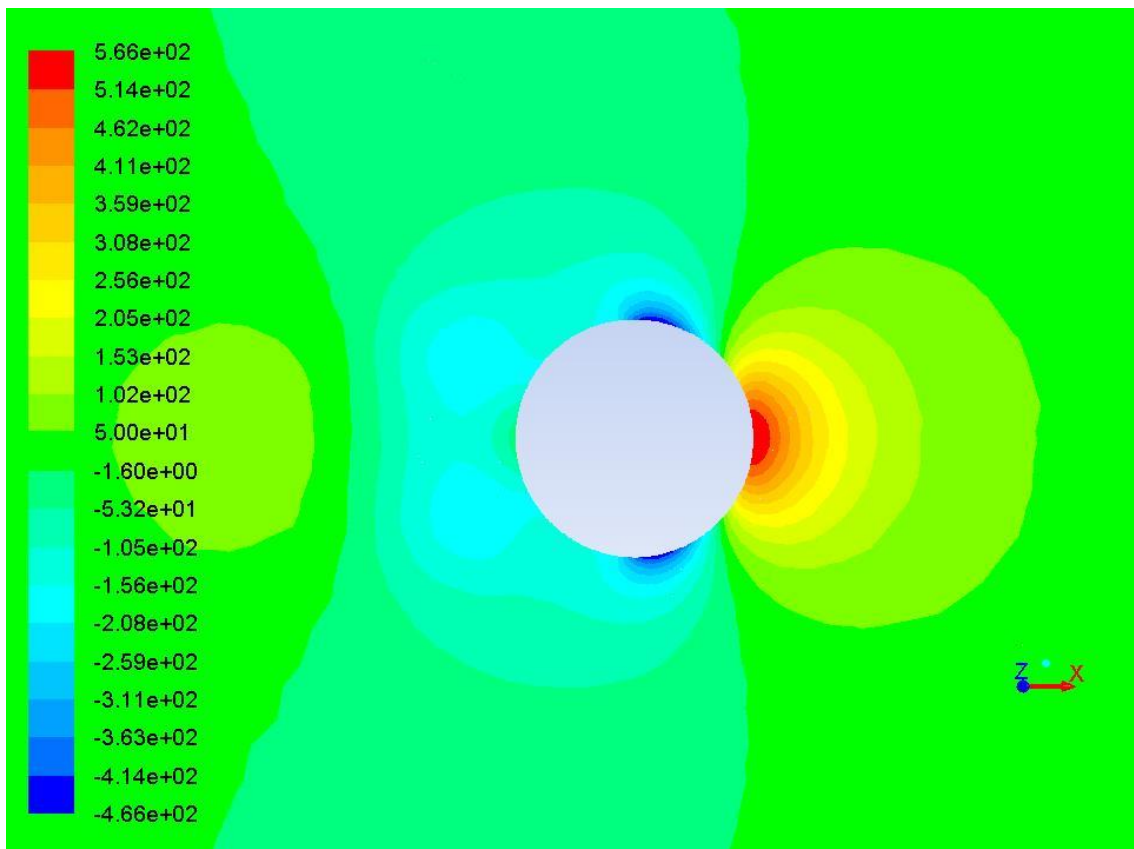


Figura 64: Presión Plano Z. 30 m/s Transitorio SST.

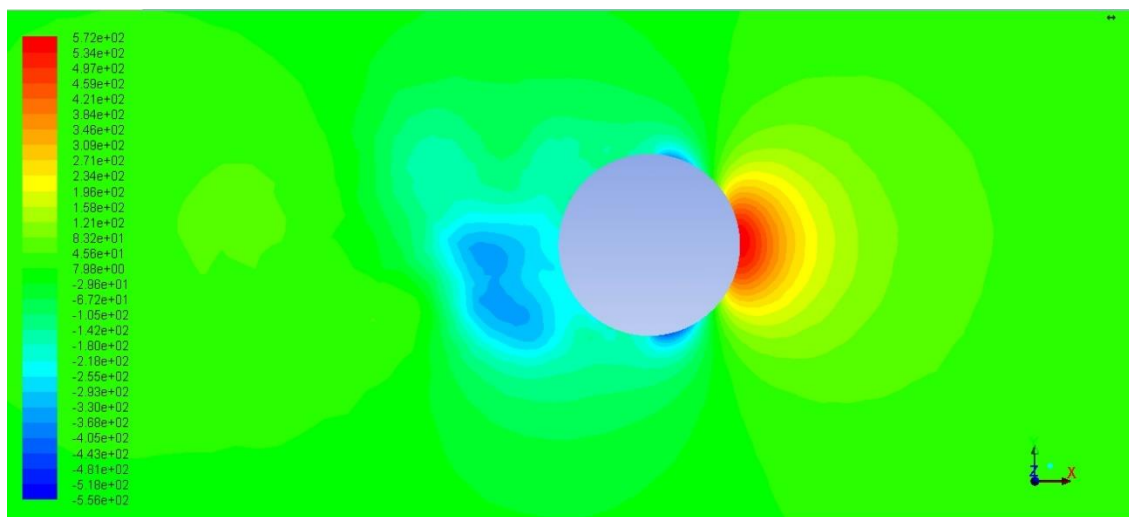


Figura 65: Presión Plano Z. 30 m/s Transitorio SAS.

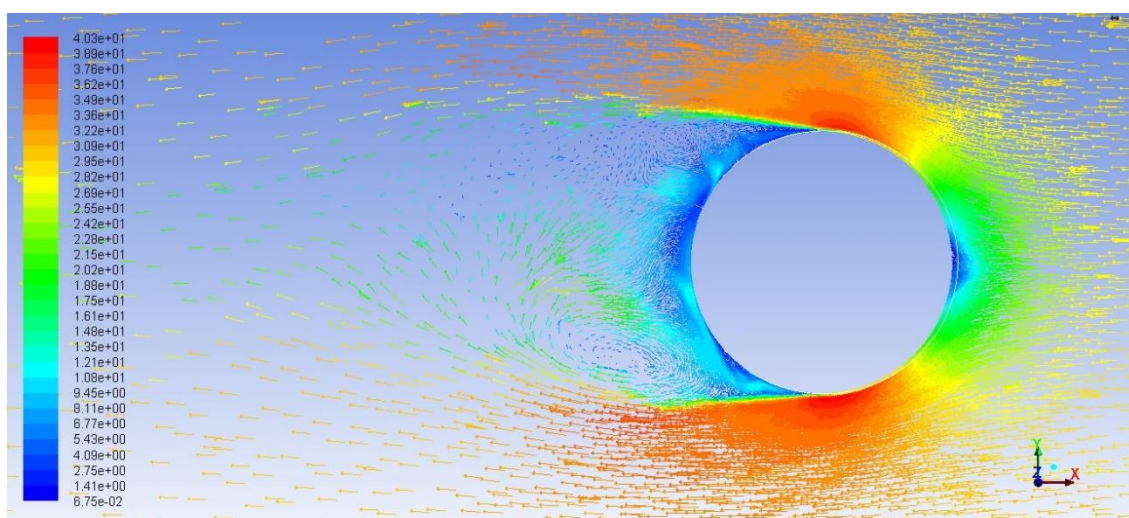


Figura 66: Velocidad Plano Z. 30 m/s Transitorio SAS.

7 Conclusiones

A lo largo de este Trabajo Final de Grado de Ingeniería Mecánica se ha mostrado el comportamiento de un flujo de aire en contacto con una esfera en un túnel de viento. Varias han sido las formas de estudio para llegar a entender los fenómenos que suceden. Es importante comprender los diferentes puntos y fundamentos teóricos que se desarrollan en el transcurso del flujo en el túnel de viento desde que el aire entra en la cámara hasta que sale.

Separando en experimental y computacional las partes estudiadas en el proyecto, experimentalmente se han realizado dos tipos de ensayos diferentes. En el primero de ellos se han medido las fuerzas resultantes sobre la esfera y el dummy, intercambiando después la posición del modelo y el dummy para así obtener la fuerza real del aire sobre la esfera restando la del modelo menos la del dummy.

En el segundo ensayo experimental, se ha ido variando la posición del pitot del túnel de viento para dibujar un perfil de velocidades y ver la variación de la velocidad a medida que se aproxima a la esfera, corroborando así, la condición de no-deslizamiento de Euler.

La parte de Dinámica Computacional de Fluidos ha ocupado un mayor tiempo de análisis y simulación por delante de la experimental. Hecho que ha influido en los resultados finales y comparaciones que se han mostrado y comentado a lo largo del trabajo. Se han simulado 2 mallas diferentes tanto en régimen estacionario como transitorio, llegando a tener hasta 8 configuraciones para aproximarse así de manera más precisa y concisa a la realidad.

Diferentes tipos de regímenes, modelos de turbulencia y saltos de tiempo han sido testados. En cuanto al régimen, como era de esperar, el que más se ha asemejado a las condiciones reales, ha sido el régimen transitorio. El salto de tiempo ha variado ya que el último establecido en la malla 1 ha sido de 1×10^{-4} y en la malla 2 de 1×10^{-5} y, los resultados han sido muy parecidos. El modelo de turbulencia con el que se han obtenido resultados más coherentes y adecuados ha sido el Scale-Adaptive Simulation (SAS) y ha sido utilizado en las dos últimas configuraciones de la malla 1 y en la configuración de la malla 2.

La segunda malla ha sido desarrollada con el objetivo de obtener unos resultados más fiables y, en comparación con la última configuración de la malla 1, la diferencia de resultados de los coeficientes de arrastre y de sustentación ha sido mínima, demostrando una proximidad a los valores reales muy alta.

Los ensayos para la obtención de las fuerzas y los coeficientes de arrastre y de sustentación, así como el ensayo de perfiles de velocidad para estudiar el comportamiento del flujo a medida que se acerca a la capa límite, han sido realizados obteniendo resultados no totalmente concordantes con la teoría, ya que los valores finales de c_D a bajas velocidades han resultado ser mayores en comparación con la bibliografía y la dinámica de fluidos computacional. Con $Re \approx 1 \times 10^4$ los resultados han sido coincidentes y concordantes.

Experimentalmente se podrían haber realizado más ensayos con la finalidad de verificar los resultados y desarrollar un modelo de estudio superior y con mayor precisión y fiabilidad además de intentar compensar el error humano y los factores externos que varían en cada momento y juegan un papel importante en el resultado final.

Varias son las gráficas mostradas y comentadas a lo largo del proyecto que demuestran un desarrollo del trabajo de manera profesional y ordenada, adaptándose siempre a las necesidades que han ido surgiendo para así conseguir los mejores resultados posibles y realizar un TFG de calidad. Así como los diferentes modelos de turbulencia utilizados para mismas velocidades o diferentes saltos de tiempo para conseguir un estudio más concreto y real.

8 Presupuesto

A continuación se detallará el presupuesto de este Trabajo de Fin de Grado. Se dividirán los costes en costes material y costes honorarios o de trabajo.

8.1. Costes Material

Dentro de los costes materiales se considerarán 4: Ordenador utilizado, licencias Ansys Fluent y Solidworks y el túnel de viento.

Para calcular el coste individual se considerarán las siguientes proporciones:

- Ordenador: 0,1€/h

Sabiendo que se ha trabajado 2h, 5 días a la semana durante los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y la mitad de enero, se obtiene un total de 20 semanas.

$$\text{Coste} = 0,1 \frac{\text{€}}{\text{h}} * 2 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} * 20 \text{ semanas} = 20\text{€}$$

- Licencia Ansys Fluent: 0,70€/h

Considerando 2h diarias durante las dos primeras semanas para crear la malla más 240h por simulación de cada configuración.

$$\text{Coste} = 0,70 \frac{\text{€}}{\text{h}} * (2 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} * 2 \text{ semanas} + 240 \frac{\text{h}}{\text{simulación}} * 9 \text{ simulaciones}) = 1526\text{€}$$

- Licencia Solidworks: 0,50€/h

Solidworks se utilizó para modelar la esfera, aproximadamente 5h.

$$\text{Coste} = 0,50 \frac{\text{€}}{\text{h}} * 5\text{h} = 2,5\text{€}$$

- Túnel de viento: 150€/semana

$$\text{Coste} = 150 \frac{\text{€}}{\text{semana}} * 3 \text{ semanas} = 450\text{€}$$

Resumidos en una tabla:

Material	Presupuesto
Ordenador	20€
Licencia Ansys Fluent	1526€
Licencia Solidworks	2,5€
Túnel de viento	450€
Coste total	1998,5€

Tabla 9: Costes material.

8.2. Costes Honorarios

Se establecen ahora los costes de personal. Considerando el precio/h del ingeniero más los gastos de desplazamiento:

- Horas trabajadas: 30€/h

$$\text{Coste} = 30 \frac{\text{€}}{\text{h}} * 2 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} * 20 \text{ semanas} = 6000\text{€}$$

- Desplazamiento: 0,19€/km

De Sant Cugat del Vallès a la EEBE hay 27km según *Googlemaps*. 3 desplazamientos mensuales de media.

$$\text{Coste} = 0,19 \frac{\text{€}}{\text{km}} * 27 \text{ km} * 3 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 5 \text{ meses} = 76,95\text{€}$$

Resumidos en una tabla:

Honorario	Presupuesto
Ingeniero	6000€
Desplazamiento	76,95€
Coste total	6076,95€

Tabla 10: Costes honorarios.

Sumando ambos costes:

$$\text{Suma costes} = \text{Costes material} + \text{costes honorario} = 1998,5 + 6076,95 = 8075,45€$$

Se le añade ahora el 6% de beneficio industrial:

$$\text{Coste con beneficio industrial} = 8075,45 + (0,06 \cdot 8075,45) = 8559,98€$$

Sumándole el IVA del 21% para obtener el precio total:

$$\text{Coste total} = 8559,98 + (0,21 \cdot 8559,98) = \mathbf{10357,58€}$$

Bibliografía

- [1] Yumusa A. Çengel & John M. Cimbala (2006). *Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición*.
- [2] Frank M. White (2003). *Mecánica de Fluidos 5ª edición*.
- [3] Hermann Schlichting (1972). *Teoría de la Capa Límite*.
- [4] Tecquipment (2017): *Wind tunnel's user guide AF100*.

Referencias

- [1] Dr. Enrique Ynaraja (13 noviembre 2014). *Vetpraxis.net*:
<https://www.vetpraxis.net/2014/11/13/articulo-flujo-sanguineo-en-los-vasos-y-camaras-cardiacas-soplos-cardiacos/>
- [2] Yuri (16 diciembre 2010). *Lapizarradeyuri.com*:
<http://www.lapizarradeyuri.com/2010/12/16/asi-vuela-un-avion/>
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_arrastre
- [4] Mónica González (23 agosto 2011). *La Guía Física*: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/dinamica-de-una-particula/coeficiente-de-presion>
- [5] (20 noviembre 2010). *F1 al día*: <http://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>
- [6] (Octubre 2013) *Reflexiones prohibidas*:
<http://reflexionesprohibidas.blogspot.com.es/2012/10/el-tunel-de-viento-el-gran-desconocido.html>
- [7] (18 octubre 2010) *Ing. Aeronáutica*:
<https://ingaeronautica.wordpress.com/2010/10/18/tunel-de-viento-2d/>
- [8] *Mos Ingenieros*: <http://www.mosingenieros.com/2016/07/unico-tunel-viento-del-mundo-cerrado-doble-camara-uem.html>

Anexo A

Se detallarán ahora las características técnicas específicas de las diferentes partes del túnel de viento.

Anexo A.1

El modelo del túnel de viento ha sido el AF100 y tiene los siguientes detalles técnicos:

Ítem	Detalles técnicos
Dimensiones y peso	3700 x 1900 x 1065 mm
Condiciones de trabajo	<p>Altitud máxima: 2000m</p> <p>Rango temperatura: 5°C - 40°C</p> <p>Humedad máxima: 80% hasta 31°C; 50% hasta 40%</p> <p>Sobretensión categoría 2 (EN61010-1)</p> <p>Grado contaminación 2 (EN61010-1)</p>
Zona de trabajo	305 x 305 x 600 mm
Velocidad nominal aire	De 0 a 36 m/s
Motor	AC trifásico con velocidad axial variable
Suministro eléctrico	
Tipo	Trifásico AC
Voltaje	415 V ó 220 V
Suministro corriente	16 A (415 V)/ 20 A (220 V) de 50 Hz hasta 60 Hz

Ítem	Detalles técnicos
Protección circuito	
Unidad de manejo	(415 V) trifásico 16 A Miniature Circuit Breakers (MCB) (220 V) trifásico 20 A MCB
IEC Outlets	6 A MCB
Suministro instrumentación de bajo voltaje	2 A MCB

Tabla 11: Detalles técnicos túnel de viento AF100 Tecquipment.

Anexo A.2

Para el cálculo de los coeficientes de arrastre y sustentación el túnel de viento utilizado, de la marca Tecquipment modelo AF100, incorpora el AFA2 Module. Este se divide en dos partes:

- El Balance Assembly (ensamblaje de equilibrio en castellano) que es un paralelogramo articulado conectado a una celda de carga. Sobre el paralelogramo se aplican momentos de flexión de manera que la fuerza del modelo es transmitida a la celda de carga.
- El Display Unit (monitor) se encarga de mostrar la fuerza medida en la celda de carga.

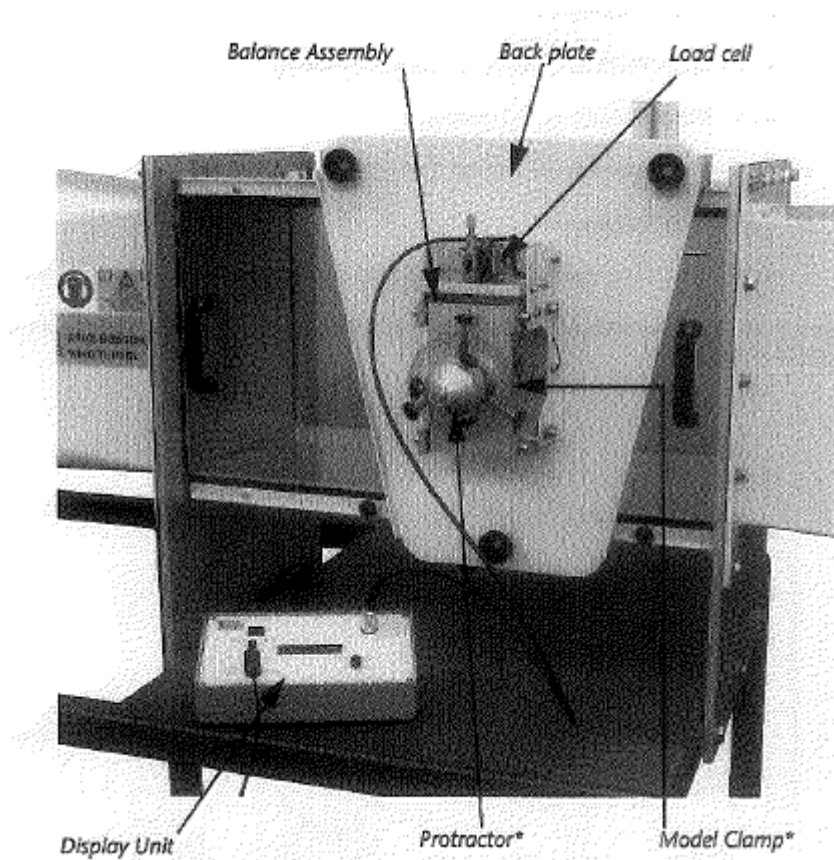


Figura 67: Vista exterior cámara ensayo túnel de viento. [Fuente: Wind tunnel's user guide]

Anexo A.2.1

Detalles técnicos:

Ítem	Detalles técnicos
Pesos	Monitor: 1 kg Balance Assembly: 5 kg
Condiciones de trabajo	Altitud máxima: 2000 m Sobretensión categoría 2 (EN61010-1)
Carga máxima	10 kg (100 N) Celda de carga = 20 kg
Monitor	12 VDC input
Fuente de alimentación	Input 90 VAC hasta 264 VAC 50 Hz hasta 60 Hz con 1A Output 12 VDC con 5A Centro positivo

Tabla 12: Detalles técnicos AFA2 Module.

Anexo B

Se especificarán a continuación las medidas de seguridad que se deben tomar para la utilización del túnel de viento.

- Uso de cascos protectores para los oídos



- Uso gafas protectoras



Debido a que el túnel de viento es capaz de alcanzar velocidades de hasta 36 m/s, es importante retirar cualquier objeto en la salida del túnel de viento para no sufrir ningún accidente involuntario.

Anexo C

En este anexo C se exponen, en forma de tabla, los datos obtenidos experimental y computacionalmente.

Anexo C.1

Tablas experimentales:

	Pitot dp (mm.c.a)	Fuerza modelo F (N)	Velocidad c (m/s)	Fuerza Dummy F(N)	Fuerza Total F(N)	Drag Cd	Reynolds Re	Mach Ma
1	5	0.15	8.9711	0.01	0.14	1.453648	30375.2	0.02639
2	10	0.25	12.6871	0.05	0.20	1.038320	42957.0	0.03731
3	13	0.31	14.4655	0.10	0.21	0.838643	48978.5	0.04255
4	15	0.35	15.5385	0.12	0.23	0.796045	52611.4	0.04570
5	19	0.46	17.4880	0.18	0.28	0.765078	59212.2	0.05144
6	22	0.5	18.8180	0.21	0.29	0.684347	63715.6	0.05535
7	23	0.52	19.2409	0.21	0.31	0.699737	65147.6	0.05659
8	25	0.58	20.0601	0.25	0.33	0.685291	67921.0	0.05900
9	30	0.69	21.9747	0.31	0.38	0.657602	74403.7	0.06463
10	35	0.76	23.7354	0.38	0.38	0.563659	80365.2	0.06981
11	40	0.86	25.3742	0.45	0.41	0.532139	85914.0	0.07463
12	45	0.97	26.9134	0.50	0.47	0.542234	91125.6	0.07916
13	50	1.09	28.3692	0.59	0.50	0.519160	96054.8	0.08344
14	55	1.15	29.7539	0.65	0.50	0.471964	100743.1	0.08751
15	60	1.29	31.0769	0.71	0.58	0.501855	105222.8	0.09140
16	65	1.34	32.3459	0.81	0.53	0.423315	109519.3	0.09513
17	70	1.47	33.5669	0.87	0.60	0.444994	113653.6	0.09873
18	75	1.51	34.7451	0.92	0.59	0.408406	117642.7	0.1021

Tabla 13: Ensayo experimental 1.

y (mm)	dP (mm H2O)	Y real (mm)	Y real (m)	c (m/s)
255	57	61	0.061	30.528
250	58	56	0.056	30.794
245	60	51	0.051	31.321
240	61	46	0.046	31.581
235	62	41	0.041	31.839
230	63	36	0.036	32.094
225	64	31	0.031	32.348
220	65	26	0.026	32.600
215	65	21	0.021	32.600
210	65	16	0.016	32.600
205	68	11	0.011	33.344
200	69	6	0.006	33.588
198	71	4	0.004	34.071
196	78	2	0.002	35.711
		0	0	0

Tabla 14: Ensayo experimental 2.

Anexo C.2

Los resultados son función de la posición que va de 0 mm (justo en contacto con la esfera) a 0,1m. Para ver los valores de posición exacto, ver tabla malla 2 a 30 m/s.

- Tabla malla 1 a 20 m/s:

MALLA 1		
20	20	20
20 SAS-1	20 SST-1	20 est SST-1
VELOCITY (m/s)	VELOCITY (m/s)	VELOCITY (m/s)
1.93997	0	0
3.13034	3.78512	3.78165
5.59288	11.6456	11.6346
6.33202	13.9987	13.9856
10.5117	17.4028	17.3903
13.9708	20.2287	20.2167
16.7099	22.0109	22.0003
19.0221	23.5025	23.4929
20.5181	24.1053	24.0965
21.8057	24.613	24.6049
22.4981	24.7478	24.7401
23.1147	24.864	24.8566
23.3803	24.8909	24.8839
23.6282	24.9142	24.9073
23.7118	24.9009	24.8944
23.7932	24.8902	24.8839
23.8136	24.8595	24.8537
23.8358	24.8345	24.829
23.8312	24.7956	24.7905
23.8346	24.7628	24.758
23.8217	24.7018	24.6971
23.8163	24.6406	24.6361
23.8154	24.6378	24.6332
23.8006	24.5924	24.5878
23.781	24.5314	24.5266
23.7804	24.5296	24.5247
23.772	24.5029	24.498

23.7443	24.457	24.452
23.6762	24.3355	24.3301
23.6734	24.3304	24.3249
23.6598	24.3053	24.2998
23.5648	24.1808	24.175
23.5629	24.1787	24.173
23.5423	24.1565	24.1507
23.4702	24.0726	24.0669
23.3486	23.9427	23.9373
23.3136	23.9084	23.9032
23.2964	23.8921	23.8869
23.2888	23.882	23.8768
23.2823	23.8722	23.8671
23.2757	23.8623	23.8572
23.2698	23.8496	23.8445
23.2664	23.8422	23.8371
23.2247	23.7608	23.7561
23.1793	23.6507	23.6462
23.1697	23.6287	23.6242
23.153	23.5906	23.5861
23.147	23.5763	23.5719
23.1444	23.5709	23.5665
23.1403	23.5623	23.5579
23.1077	23.5031	23.4988
23.1062	23.5004	23.4961
23.0824	23.4578	23.4536
23.0216	23.3491	23.345
23.0063	23.328	23.324
22.9846	23.2999	23.2958
22.9709	23.2822	23.2782
22.8996	23.2004	23.1965
22.8477	23.1414	23.1375
22.8012	23.0884	23.0847

22.7304	23.0128	23.0091
22.634	22.9078	22.9042
22.6149	22.8869	22.8834
22.5967	22.8665	22.863
22.5686	22.829	22.8256
22.5152	22.7577	22.7543
22.477	22.7064	22.7031
22.4529	22.6742	22.6709
22.4443	22.6622	22.659
22.3861	22.5791	22.576
22.2906	22.4374	22.4345
22.2887	22.4348	22.4319
22.2255	22.3473	22.3446
22.1702	22.2895	22.2868
22.1682	22.2875	22.2849
21.978	22.1048	22.1023
21.9722	22.0987	22.0963
21.9503	22.0729	22.0704
21.8141	21.9146	21.9117
21.795	21.8919	21.8889
21.7762	21.8688	21.8658
21.7748	21.8671	21.8641
21.6483	21.7154	21.7127
21.6407	21.7066	21.704
21.6345	21.6995	21.6969
21.5384	21.5922	21.5905
21.4722	21.5163	21.5149
21.4151	21.4509	21.4493

21.3875	21.416	21.4144
21.3065	21.3141	21.3124
21.2503	21.2484	21.2468
21.1634	21.1467	21.1453
21.139	21.1152	21.1139
21.1304	21.1047	21.1034
21.1262	21.1002	21.0989
21.0053	20.9787	20.9777
20.9845	20.959	20.958
20.9588	20.9347	20.9337
20.9227	20.901	20.9001
20.8163	20.7864	20.7857
20.8158	20.7857	20.785
20.8147	20.7846	20.7839
20.7837	20.7499	20.7493
20.78	20.7458	20.7452
20.7574	20.722	20.7215
20.74	20.7043	20.7037
20.7111	20.6746	20.6742
20.6809	20.6439	20.6435
20.6755	20.6389	20.6386
20.6629	20.6275	20.6272
20.6597	20.6247	20.6244
20.6463	20.6117	20.6118
20.6186	20.5851	20.5857
20.6132	20.5798	20.5778

Tabla 15: Resultados malla 1 20 m/s.

- Tabla malla 1 a 30 m/s:

MALLA 2		
30	30	30
30 SAS-1	30 SST-1	30 est SST-1
VELOCITY (m/s)	VELOCITY (m/s)	VELOCITY (m/s)
0	0	0
2.43337	7.20833	7.17571
7.82588	22.1523	22.06
9.34952	26.6279	26.5155
15.5408	30.9763	30.8728
20.7071	34.5803	34.4855
24.6173	36.3522	36.2788
28.009	37.8254	37.7725
30.0728	38.2303	38.1882
31.8475	38.5687	38.5369
32.7596	38.5924	38.5656
33.5594	38.6139	38.5916
33.8736	38.5604	38.5443
34.1631	38.516	38.5052
34.2407	38.4345	38.4304
34.3157	38.367	38.3688
34.3352	38.2788	38.2856
34.3554	38.2043	38.2159
34.3705	38.1102	38.1243
34.3896	38.0293	38.0461
34.4218	37.8952	37.914
34.4587	37.7645	37.7852
34.4589	37.7587	37.7794
34.4612	37.6664	37.6876
34.4639	37.5402	37.5618
34.464	37.5365	37.5581
34.4655	37.482	37.5037
34.4461	37.3928	37.4141
34.4098	37.1565	37.1765
34.4085	37.1461	37.166
34.402	37.0956	37.1152
34.2873	36.8529	36.8714
34.285	36.8489	36.8674
34.2608	36.8059	36.8243

34.1766	36.6452	36.6629
34.0215	36.4036	36.4205
33.9753	36.3393	36.356
33.9524	36.3075	36.3242
33.9439	36.2882	36.3048
33.9369	36.2695	36.2862
33.9296	36.2505	36.2671
33.9269	36.2259	36.2425
33.9253	36.2116	36.2281
33.9025	36.0531	36.0689
33.8831	35.8516	35.8674
33.8767	35.812	35.8277
33.8657	35.7431	35.7588
33.8638	35.7173	35.733
33.8625	35.7076	35.7233
33.8604	35.6926	35.7083
33.8322	35.5866	35.6024
33.8309	35.5819	35.5977
33.8109	35.5053	35.5211
33.7601	35.3098	35.3255
33.7431	35.273	35.2886
33.7195	35.2225	35.2379
33.7047	35.1908	35.2062
33.6222	35.0431	35.0582
33.5609	34.937	34.9518
33.506	34.842	34.8564
33.4159	34.71	34.7245
33.2874	34.5305	34.5448
33.2619	34.4949	34.5092
33.2374	34.4597	34.474
33.2033	34.3983	34.4127
33.1388	34.2807	34.2952
33.0916	34.1967	34.2112
33.0615	34.1436	34.1582
33.0499	34.1252	34.1396
32.9721	33.9919	34.0059
32.8446	33.7628	33.7758
32.8423	33.7586	33.7716
32.7633	33.6147	33.6272
32.6941	33.5187	33.531

32.6917	33.5155	33.5277
32.459	33.2121	33.2234
32.4523	33.2023	33.2136
32.4255	33.1601	33.1712
32.2604	32.9011	32.9114
32.2378	32.8643	32.8745
32.2151	32.827	32.837
32.2134	32.8242	32.8343
32.0792	32.58	32.5892
32.0694	32.5659	32.5751
32.0615	32.5545	32.5637
31.9299	32.3869	32.3953
31.848	32.2662	32.2741
31.7739	32.1637	32.1707
31.7412	32.1089	32.1155
31.6403	31.9441	31.9499
31.5748	31.8407	31.8462
31.4736	31.6808	31.6858
31.4443	31.6306	31.6355
31.4346	31.6139	31.6187
31.4295	31.607	31.6118

31.2928	31.4218	31.4264
31.2699	31.3913	31.3957
31.2417	31.3537	31.358
31.2003	31.3026	31.306
31.0796	31.1261	31.1276
31.0791	31.125	31.1265
31.078	31.1233	31.1248
31.0451	31.0706	31.0721
31.0412	31.0644	31.0658
31.0153	31.0276	31.0288
30.9954	31.0003	31.0014
30.9623	30.9548	30.9556
30.928	30.9074	30.9079
30.9214	30.8998	30.9005
30.906	30.8825	30.8833
30.902	30.8782	30.8791
30.8864	30.858	30.8593
30.8538	30.8164	30.8184
30.8476	30.8083	30.8103

Tabla 16: Resultados malla 1 30 m/s.

- Tabla malla 2 a 30 m/s:

MALLA 2		
		30
		30 SAS-2
Y- POSITION	Y (m)	VELOCITY (m/s)
0.024998	0	0
0.025052	5.4E-05	5.43182
0.025163	0.000165	16.6523
0.025197	0.000199	20.0328
0.025327	0.000329	25.847
0.025436	0.000438	30.6263
0.025591	0.000593	32.9514
0.025722	0.000724	34.8951
0.025907	0.000909	35.4657
0.026063	0.001065	35.9603
0.026278	0.00128	36.0387
0.026463	0.001465	36.1155
0.026702	0.001704	36.0582
0.026908	0.00191	36.0139
0.027158	0.00216	35.911
0.027374	0.002376	35.8213
0.027628	0.00263	35.7392
0.027848	0.00285	35.6662
0.028107	0.003109	35.5743
0.02833	0.003332	35.4958
0.028595	0.003597	35.4138
0.02882	0.003822	35.3425
0.029092	0.004094	35.2731
0.029318	0.00432	35.2143
0.029597	0.004599	35.1365
0.029824	0.004826	35.0743
0.030111	0.005113	34.9628
0.030338	0.00534	34.8724
0.030633	0.005635	34.7371
0.03086	0.005862	34.6282
0.031165	0.006167	34.5121
0.031389	0.006391	34.4259
0.031706	0.006708	34.3741

0.031927	0.006929	34.3427
0.032255	0.007257	34.3124
0.032472	0.007474	34.298
0.032813	0.007815	34.2476
0.033025	0.008027	34.2225
0.033379	0.008381	34.1548
0.033586	0.008588	34.1192
0.033957	0.008959	34.024
0.034153	0.009155	33.974
0.034175	0.009177	33.9706
0.034406	0.009408	33.9339
0.034514	0.009516	33.9188
0.034611	0.009613	33.9055
0.034635	0.009637	33.8976
0.034662	0.009664	33.8886
0.034851	0.009853	33.83
0.034936	0.009938	33.8043
0.035097	0.010099	33.7554
0.035464	0.010466	33.6399
0.035538	0.01054	33.6164
0.03561	0.010612	33.5931
0.035728	0.01073	33.5557
0.035846	0.010848	33.5206
0.035963	0.010965	33.4858
0.036176	0.011178	33.4248
0.036311	0.011313	33.3847
0.036343	0.011345	33.3797
0.036358	0.01136	33.3769
0.03644	0.011442	33.3616
0.036658	0.01166	33.3205
0.036889	0.011891	33.2762
0.037218	0.01222	33.2132
0.037292	0.012294	33.1986
0.037305	0.012307	33.1968
0.037328	0.01233	33.1935
0.037358	0.01236	33.189
0.037798	0.0128	33.1247
0.038597	0.013599	33.021
0.038667	0.013669	33.0135

0.038815	0.013817	32.9965
0.039092	0.014094	32.9649
0.039732	0.014734	32.8958
0.039835	0.014837	32.8828
0.04005	0.015052	32.8556
0.04058	0.015582	32.786
0.041615	0.016617	32.6569
0.041728	0.01673	32.6406
0.041947	0.016949	32.6091
0.042309	0.017311	32.5561
0.043638	0.01864	32.4108
0.044109	0.019111	32.3593
0.044194	0.019196	32.35
0.044308	0.01931	32.336
0.044316	0.019318	32.3354
0.044349	0.019351	32.3329
0.044446	0.019448	32.3259
0.044467	0.019469	32.3244
0.044632	0.019634	32.3125
0.045239	0.020241	32.269
0.046747	0.021749	32.161
0.047345	0.022347	32.12

0.047708	0.02271	32.0951
0.047941	0.022943	32.081
0.048618	0.02362	32.0366
0.049695	0.024697	31.966
0.049885	0.024887	31.9549
0.049997	0.024999	31.9487
0.050913	0.025915	31.8986
0.052259	0.027261	31.8331
0.052359	0.027361	31.8284
0.052576	0.027578	31.8179
0.055993	0.030995	31.6663
0.056999	0.032001	31.6223
0.05743	0.032432	31.6003
0.058081	0.033083	31.5714
0.060082	0.035084	31.4733
0.061654	0.036656	31.3963
0.062319	0.037321	31.3789
0.063197	0.038199	31.3549
0.063885	0.038887	31.3361
0.071535	0.046537	31.1381

Tabla 17: Resultados malla 2, 30 m/s.

FIRMADO:

Guillem Chicharro López

FECHA:

